

# Inhalt

<b>Inhalt .....</b>	<b>I</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>IV</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>VI</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>VII</b>
<b>1      Einleitung .....</b>	<b>9</b>
<b>2      Analyse der Aufgabenstellung .....</b>	<b>12</b>
2.1 <i>Analyse und Bewertung der Qualitätskriterien .....</i>	<i>16</i>
2.1.1      Änderungen der Wanddicke .....	16
2.1.2      Reproduzierbarkeit .....	16
2.1.3      Abweichung der Ist-Kontur von der Soll-Kontur.....	18
2.1.4      Querschnittsdeformationen .....	20
2.2 <i>Messmittel und Vorgabe von Toleranzbereichen .....</i>	<i>23</i>
2.3 <i>Randbedingungen der Versuchseinrichtung HexaBend .....</i>	<i>26</i>
<b>3      Vorgehensweise .....</b>	<b>30</b>
3.1 <i>Einschränkung des Betrachtungsraumes .....</i>	<i>30</i>
3.1.1      Einfluss von Reibverhältnissen.....	31
3.1.2      Lage der Schweißnaht .....	32
3.1.3      Gestalt/ Abfolge der Konturelemente .....	33
3.1.4      Biegen ohne Dorn/ Biegen mit Dorn.....	34

II	Inhalt
3.1.5	Änderung der Prozessgeschwindigkeit ..... 36
3.1.6	Variation des Werkzeugabstandes ..... 37
3.1.7	Minimaler/ Maximaler Biegefaktor ..... 38
3.2	<i>Erstellung der Versuchspläne</i> ..... 40
3.2.1	Versuchsreihen V1a und V1b ..... 43
3.2.2	Versuchsreihe V2 ..... 46
<b>4</b>	<b>Versuchsdurchführungen ..... 48</b>
4.1	<i>Durchführung der Versuchsreihe V1a</i> ..... 48
4.2	<i>Durchführung der Versuchsreihe V1b</i> ..... 49
4.3	<i>Durchführung der Versuchsreihe V2</i> ..... 50
<b>5</b>	<b>Auswertung ..... 52</b>
5.1	<i>Kleinst erzielbarer Biegeradius (Versuchsreihe V1a)</i> ..... 54
5.2	<i>Größter Biegeradius bei gegebener Wiederholgenauigkeit (Versuchsreihe V1b)</i> ..... 55
5.3	<i>Erhöhung der Prozessgeschwindigkeit (Versuchsreihe V2)</i> ..... 57
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung ..... 61</b>
6.1	<i>Ergebnisse</i> ..... 61
6.2	<i>Fazit</i> ..... 62
<b>Glossar</b>	<b>..... 65</b>

---

<b>Quellenverzeichnis .....</b>	<b>69</b>
<b>Anlagen .....</b>	<b>73</b>
<b>Anlage - Versuchsprotokolle V1a .....</b>	<b>A-I</b>
<b>Anlage - Versuchsprotokolle V1b .....</b>	<b>A-V</b>
<b>Anlage - Versuchsprotokolle V2 .....</b>	<b>A-IX</b>
<b>Anlage - Auswertungstabellen.....</b>	<b>A-XIII</b>
<b>Anlage - NC-Programm.....</b>	<b>A-XVI</b>
<b>Anlage - Darstellung der Antastpunkte .....</b>	<b>A-XIX</b>
<b>Anlage - Zugproben .....</b>	<b>A-XX</b>
<b>Selbstständigkeitserklärung</b>	

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Beispiel für den Einsatz freiformgebogener Profile in der Praxis [Schlaepfer2013].....	9
Abbildung 2: Gesamtansicht der Versuchseinrichtung HexaBend [IWU2013].....	10
Abbildung 3: Einflussgrößen auf das Biegeergebnis, aus denen ausgewählt werden kann .....	13
Abbildung 4: Bildschirmfoto der Bedienoberfläche der Prozessplanungssoftware „ProTUBA“ .....	15
Abbildung 5: Biegen eines Teiles, bei dem sich Biegeradius und die Biegeebene kontinuierlich verändern [IWU2013].....	19
Abbildung 6: Maximaler und minimaler Außendurchmesser eines ovalisierten Profilquerschnittes .....	20
Abbildung 7: Einfall des Profilquerschnittes .....	21
Abbildung 8: Geometriedefinitionen am Beispiel eines idealen Rohrbogens [VDI-Entwurf2011].....	22
Abbildung 9: Beispiel für Toleranzen bei der industriellen Fertigung von Rohrbögen [Schuster2011] .....	25
Abbildung 10: Schnitt des CAD-Modells des eingesetzten Werkzeugsatzes [IWU2013] .....	27
Abbildung 11: Umformkomponenten der Versuchseinrichtung [IWU2013] .....	28
Abbildung 12: Zu erwartende Auswirkungen auf die Regelabweichung der Streben bei Variation dieser ausgewählten Prozessparameter .....	29

Abbildung 13: Einflussgrößen auf den Biegeradius bei dem Drei-Rollen-Schubbiegen von Rohrprofilen [Kersten2012].....	31
Abbildung 14: Zugversuche für die Bestimmung des Einflusses der Lage der Schweißnaht auf das Biegeergebnis.....	33
Abbildung 15: Biegeteil mit konstanter Biegeebene und konstantem Biegeradius....	34
Abbildung 16: Arten von Biegedornen: 1 Fingerdorn; 2 Löffeldorn; 3 Kugeldorn; 4 Kugelringgelenkdorn; 5 Kugelgelenkdorn [VDI-Entwurf2011] .....	35
Abbildung 17: Lage des Werkzeugabstandes $w$ .....	38
Abbildung 18: Biegeteil T050 der Versuchsreihe V1a .....	48
Abbildung 19: Biegeteil aus der Versuchsreihe V1b .....	49
Abbildung 20: Biegeteil aus der Versuchsreihe V2 .....	50
Abbildung 21: Aufspannung eines Biegeteiles auf den Messtisch .....	53
Abbildung 22: Resultate der Versuchsreihe V1b.....	56
Abbildung 23: Gesamtauswertung der Versuchsreihe V1b.....	57
Abbildung 24: Auswirkung der Erhöhung der Prozessgeschwindigkeit auf den Ist-Radius .....	58
Abbildung 25: Zusammenstellung der Messergebnisse der Versuchsreihe V2 ..	59
Abbildung 26: Biegevorgang von T071 - Ausschnitt aus dem Video, welches mit einer Thermokamera aufgenommen wurde .....	60

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die vorhandenen Messmittel .....	23
Tabelle 2: Die wichtigsten Leistungsdaten der Versuchseinrichtung im Überblick.... .....	26
Tabelle 3: Schema zur eindeutig nachvollziehbaren Benennung der Biegeteile...	41
Tabelle 4: Planung der Versuchsreihen V1a und V1b .....	43
Tabelle 5: voraussichtliche Durchführung der Versuchsreihe V1a.....	44
Tabelle 6: geplante Durchführung des V1b-Vorversuches.....	45
Tabelle 7: geplante Durchführung der Versuchsreihe V1b .....	45
Tabelle 8: Planung der Versuchsreihe V2.....	46
Tabelle 9: geplante Durchführung der Versuchsreihe V2 .....	47

## Abkürzungsverzeichnis

$B$	Biegefaktor
CAD	Computer Aided Design
$D = H$	Nennaußendurchmesser des Biegehalbzeuges
$D_{max} = H_Q$	maximaler Außendurchmesser
$D_{min} = H_R$	minimaler Außendurchmesser
FE	Finite-Elemente
$R_a$	Biegeradius am Außenbogen
$R_i$	Biegeradius am Innenbogen
$R_{Ist}$	Ist-Biegeradius
$R_{Soll}$	Soll-Biegeradius
$s$	Wanddicke des Biegehalbzeuges
TCP1	Werkzeugsbezugspunkt 1
TCP2	Werkzeugsbezugspunkt 2
$u$	Ovalisierung (Unrundheit) des Biegeteiles
$v_{fP}$	Vorschubgeschwindigkeit der Pusherachse
$w$	Werkzeugabstand
$\alpha$	Biegewinkel





# 1 Einleitung

Freiformgebogene Profile sind heutzutage ein Nischenprodukt, welches immer mehr an Bedeutung gewinnt. Dabei kann mit nur einem Werkzeugsatz eine Vielzahl an Biegegeometrien mit konstanten Radien, aber auch mit kontinuierlich variablen Radiusverläufen hergestellt werden. Durch die hohe Steifigkeit bei gleichzeitig geringem Gewicht besitzen diese Bauteile vor allem im Leichtbau von Karosserien und Tragwerken eine große Gebrauchstauglichkeit (siehe Abbildung 1). In der Möbelindustrie stehen neben der Gewichtseinsparung die vielfältigen gestalterischen Möglichkeiten freiformgebogener Profile im Vordergrund. Ein weiterer Pluspunkt ist bei dem Wegfallen von Schweißverbindungen zu sehen. Das verringert einerseits in der Rohrleitungstechnik den Strömungswiderstand und andererseits führt es zu der Verkürzung von Prozessketten - und damit zu einer Kostenreduktion im Karosseriebau. [Hermes2012]-(Kapitel 2); [Kersten/Engel2010]-(Kapitel 1); [Gerlach2010]-(Kapitel 1)



*Abbildung 1: Beispiel für den Einsatz freiformgebogener Profile in der Praxis [Schlaepfer2013]*

Es gibt mehrere Verfahren, um Profile dieser Art herzustellen. Die am Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik in Chemnitz (IWU) entwickelte und patentierte Versuchseinrichtung HexaBend (siehe Abbildung 2) verfolgt das

Prinzip des Freiform-Druckbiegens. Dabei wird das Profil kontinuierlich durch eine sich gleichzeitig bewegende Gleitführung geschoben. Die zu fertigende Kontur des Biegeteiles wird nicht durch ein formspeicherndes Werkzeug vorgegeben, sondern sie stellt sich frei zwischen den Gleitführungen des feststehenden und des beweglichen Werkzeuges ein.



*Abbildung 2: Gesamtansicht der Versuchseinrichtung HexaBend [IWU2013]*

„Auffälligste Besonderheit der HexaBend ist eine hydraulisch angetriebene sechssachsige Parallelkinematik (Hexapod), welche als Endeffektor die bewegliche Matrice [Gleitführung des beweglichen Werkzeuges] trägt und diese in drei translatorischen und drei rotatorischen Freiheitsgraden gezielt im Arbeitsraum positionieren kann.“ [IWU2012]-(Kapitel 2). Der Vorschub des Profils in Richtung der Gleitführung des beweglichen Werkzeuges wird durch den sogenannten "Pusher" erzeugt, welcher elektromechanisch angetrieben wird. Zusätzlich besteht insbesondere für dünnwandige Rohre die Möglichkeit, den Biegevorgang durch ein elektromechanisch positionierbares Dornwerkzeug zu unterstützen. Die Erzeugung der Kontur

des Biegeteiles basiert auf Relativbewegungen zwischen dem Pusher und dem beweglichen Biegewerkzeug, die zu einer räumlichen Umlenkung der Profillängsachse führen. [IWU2012]-(Kapitel2)

Auf Grund der Drucküberlagerung in der Biegezone tritt während des Freiform-Druckbiegens tendenziell eine Vergrößerung der Wanddicke des Biegeteiles auf, bzw. die Ausdünnung am Außenbogen ist geringer als bei anderen Biegeverfahren. Die Gefahr der Rissbildung am Außenbogen ist sehr gering. Das wirkt sich zum Beispiel positiv auf die anschließende Durchführung eines Innenhochdruckumformprozesses aus, durch den weitere Ausformungen am Außenbogen auftreten. [IWU2011?]

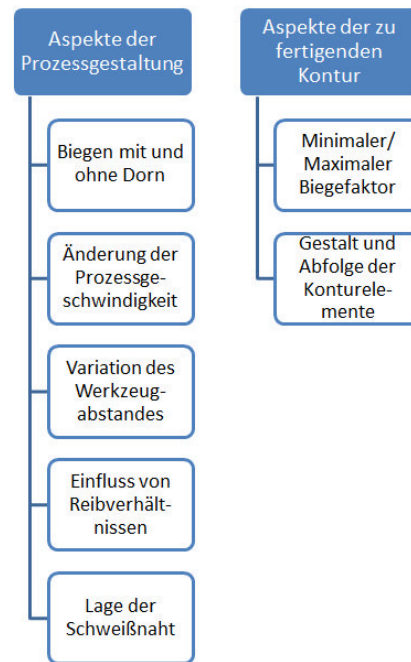
## 2 Analyse der Aufgabenstellung

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, eine Vorgehensweise zu erarbeiten, mit welcher die folgenden zwei Punkte für eine konkrete Biegeaufgabe einfach und sicher bestimmbar werden:

- Die tatsächliche Signifikanz möglicher Einflussgrößen
- Die optimalen Prozessparameter.

Im Kapitel 4 – „Versuchsdurchführungen“ wird diese theoretisch erarbeitete Vorgehensweise im Hinblick auf ihre Tauglichkeit für die Praxis experimentell erprobt. Mit dem Kriterium „Tauglichkeit für die Praxis“ ist gemeint, dass die erarbeitete Vorgehensweise möglichst effektiv und vor allem wiederverwendbar sein sollte. Effektivität ist in diesem Zusammenhang so zu verstehen, dass mit einer möglichst geringen Anzahl an Versuchen (daraus folgt Zeitersparnis und geringerer Materialverbrauch, was Kosten spart) ein maximaler Erkenntnisgewinn erzielt wird. Die Wiederverwendbarkeit der erarbeiteten Vorgehensweise ist hier als Maß dafür zu sehen, wie gut sie von jeder anderen Person, die zukünftig Versuchsreihen mit der Versuchseinrichtung HexaBend durchführt, auf die jeweilige Problemstellung angewandt werden kann.

Für die experimentellen Untersuchungen soll aus den folgenden möglichen Einflussgrößen ausgewählt werden (siehe Abbildung 3):



*Abbildung 3: Einflussgrößen auf das Biegeergebnis, aus denen ausgewählt werden kann*

Um den Umfang dieser Arbeit nicht zu groß werden zu lassen, können keine weiteren Aspekte untersucht werden. Eine Eingrenzung der Aspekte auf die oben genannten muss aber auch deshalb erfolgen, weil entweder die praktischen Voraussetzungen zu deren Untersuchung nicht gegeben sind, oder ihr Einfluss als nicht signifikant für den Biegeprozess angesehen werden kann. Ein Beispiel für einen nicht untersuchten Aspekt ist die Steifigkeit der Maschine mit ihren möglichen Einflussgrößen auf das Biegeergebnis. Bei dem verwendeten Biegehalbzeug sind aufgrund von Erfahrungen aus vorherigen Versuchsreihen keine nennenswerten Deformationen am Maschinengestell zu erwarten. Bei Versuchen mit widerstandsfähigeren Profilquerschnitten, wie zum Beispiel Profilen mit großen Wanddicken, müsste man diesen Aspekt mit Sicherheit aufgreifen.

Die Diskussion um die sinnvolle Einschränkung der experimentellen Untersuchung oben genannter Einflussgrößen ist Teil des Kapitels 3.

Anschließend an die Versuchsreihen erfolgt im Kapitel 5 eine Auswertung die zeigen wird, inwiefern die untersuchten möglichen Einflussgrößen und die Pro-

zessparameter für das Biegeergebnis signifikant sind, das heißt ob und in welchem Maße sie das Biegeergebnis beeinflussen.

Die folgenden vier Qualitätskriterien können für diese Bewertung herangezogen werden:

- Abweichung der Ist-Kontur von der Soll-Kontur
- Querschnittsdeformationen (Ovalisierung, Einfall, Falten)
- Waddickenänderungen
- Reproduzierbarkeit

Die Festlegung welche Qualitätskriterien davon für die Bewertung welcher Versuche herangezogen werden, erfolgt im Kapitel 3.1: Einschränkung des Betrachtungsraumes.

Durch die Kombination der erlangten Ergebnisse mit der bereits vom IWU entwickelten Prozessplanungssoftware „ProTUBA“ (siehe Abbildung 4) kann die Prozessplanung, auch im Hinblick einer in Zukunft möglichen Weiterentwicklung der Versuchseinrichtung HexaBend in Richtung Serienreife, nutzerfreundlicher und damit auch beherrschbarer werden.

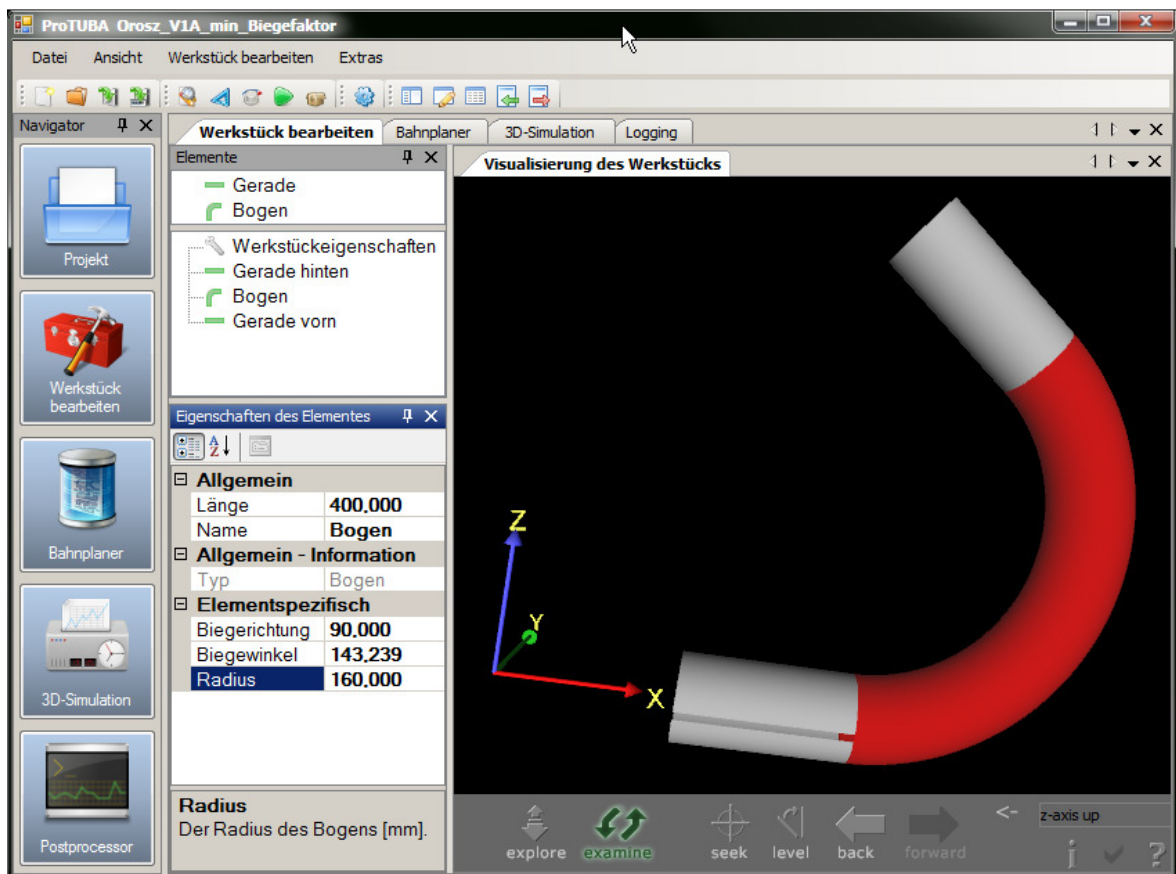


Abbildung 4: Bildschirmfoto der Bedienoberfläche der Prozessplanungssoftware „ProTUBA“

Andere Herangehensweisen an die Prozessgestaltung des 3D-Freiformbiegens sind zum Beispiel die Vorbestimmung der erforderlichen Biegeparameter anhand von Modellen für die unterschiedlichen Biegephasen und anhand vorgegebener Daten, wie zum Beispiel Werkstoffkennwerte des Biegehalbzeuges. Zusätzlich kann die Erstellung von FE-Simulationen erfolgen. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse werden für die Vorhersage der Biegeparameter genutzt. Der Vergleich der Modelle und Simulationen mit Ergebnissen aus Biegeversuchen unter Zuhilfenahme des Umformgrades führt gegebenenfalls zur Korrektur der Biegeparameter. Dadurch können sich Theorie und Praxis sinnvoll ergänzen. Nachteilig an dieser Herangehensweise ist, dass man für die Modellbildung einen relativ großen Aufwand betreiben muss. Jedoch kann es sein, dass die Vorhersagegenauigkeit der Modelle für die Fertigung eines endkonturnahen Biegeteiles trotzdem nicht ausreicht. Um die zu erreichen, bedarf es einer noch genaueren Modellbildung,

die unter Einbeziehung weiterer Aspekte möglich wird. Das geht wiederum mit steigendem Zeitaufwand und folglich höheren Kosten einher. [Kopfer2009]-(Kapitel 3-7); [Gerlach2010]-(Kapitel 2-8)

Im Gegensatz zur Kombination von theoretischer Modellbildung mit experimentell ermittelten Erkenntnissen soll im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich eine experimentelle Vorgehensweise erfolgen. Diese wird im Kapitel 3 erläutert.

## **2.1 Analyse und Bewertung der Qualitätskriterien**

Die Bewertung der zu untersuchenden Einflussgrößen anhand der Qualitätskriterien kann in zwei unterschiedlichen Arten erfolgen - entweder quantitativ oder qualitativ. Bei der quantitativen Bewertung basiert die Entscheidung, ob ein Gutteil oder Ausschussteil gefertigt wurde auf einem Messwert, und bei der qualitativen Bewertung wird diese Entscheidung entweder mit Hilfe von Lehren oder anhand einer Sichtprüfung oder Beobachtung getroffen.

### **2.1.1 Änderungen der Wanddicke**

Eventuell auftretende Änderungen der Wanddicke werden nicht als Qualitätskriterium für die Bewertung der Biegeergebnisse herangezogen. Wie schon im ersten Kapitel erläutert, tritt verfahrensbedingt während des Freiform-Druckbiegens tendenziell keine starke Verringerung der Wanddicke auf. Jedoch ist bei Verwendung von Biegehalbzeugen mit sehr kleinen Wanddicken unter Umständen eine nicht mehr hinnehmbare Verringerung zu erwarten, was eine Untersuchung dahingehend notwendig machen würde.

### **2.1.2 Reproduzierbarkeit**

Das Qualitätskriterium Reproduzierbarkeit beinhaltet zwei Aspekte. Zum einen die Prozesssicherheit, welche aufzeigt ob das Biegehalbzeug überhaupt zuverlässig gebogen wird oder nicht. Ein Beispiel hierfür ist ein zu klein gewählter Biegeradius, weswegen der Versagensfall eintritt. Der Einfall des Profilquerschnittes oder die Faltenbildung ist dabei so stark ausgeprägt, dass die Fortführung des Biegeprozesses nicht möglich ist. In diesem Falle ist zum Beispiel die Abweichung der Ist-



Kontur von der Soll-Kontur des Biegeteiles uninteressant, da der Biegeprozess wahrscheinlich abgebrochen werden muss. Das Prozessfenster ist nicht sicher. Selbst wenn der Biegeprozess zu Ende geführt werden kann, führt der Einfall des Profilquerschnittes oder die Faltenbildung je nach späterem Verwendungszweck meistens dazu, dass das Biegeteil Ausschuss ist. Daraus lässt sich schließen, dass bei der Nichterfüllung des Kriteriums Prozesssicherheit die Erfüllung anderer Kriterien gar nicht erst untersucht werden braucht.

Der andere Aspekt ist die Wiederholgenauigkeit. Diese zeigt bei dem wiederholten Fertigen derselben Kontur unter sonst konstanten Rahmenbedingungen und Prozessparametern auf, wie stark sich die Abweichungen der Ist-Kontur von der Soll-Kontur zwischen den Biegeteilen unterscheiden. Ein Beispiel für die Beeinflussung der Wiederholgenauigkeit sind Eigenschaftsschwankungen des Biegehalbzeuges, die auch innerhalb einer Charge auftreten. In diesem Zusammenhang sind vor allem Schwankungen der mechanischen Eigenschaften und der Wanddicke relevant, welche zu einer lokalen Zu- oder Abnahme des Widerstandes gegen Verformung führen. Außerdem ist die Wiederholgenauigkeit abhängig von der Richtung, in die gebogen wird. Je nach dem in welche Richtung sich das bewegliche Werkzeug laut Programmierung neigt, verändern sich die auf den Hexapoden wirkenden Kraftverhältnisse und damit auch dessen Bahngenauigkeit. Im Rahmen dieser Arbeit wird ausschließlich senkrecht nach oben gebogen.

Die Reproduzierbarkeit des Biegeergebnisses ist nur gegeben, wenn beide oben genannten Aspekte erfüllt sind. Es ist ein sehr wichtiges Kriterium im Hinblick auf die Fertigung im industriellen Maßstab, weil sich ohne gegebene Reproduzierbarkeit keine sicheren Prozessfenster ergeben und damit auch kein vorheriges Abschätzen des Fertigungsaufwandes und damit der Fertigungskosten möglich ist.

Im Rahmen dieser Arbeit werden für die Bewertung der Biegeergebnisse mithilfe des Qualitätskriteriums Reproduzierbarkeit folgende Festlegungen getroffen:

- die Bewertung der Prozesssicherheit erfolgt qualitativ auf Grundlage von Beobachtungen,
- dagegen wird mit Hilfe der Wiederholgenauigkeit eine quantitative (auf Messungen basierende) Bewertung vorgenommen.

### **2.1.3 Abweichung der Ist-Kontur von der Soll-Kontur**

Die Kontur eines Biegeteiles ist durch einen oder mehrere Biegebögen und Geradenabschnitte gekennzeichnet, die Geradenabschnitte können jedoch auch fehlen. In diesem Falle spricht man von einer Bogen-an-Bogen-Kontur. Der einzelne Biegebogen wird wiederum durch einen vorzugebenden Biegeradius und Biegewinkel charakterisiert, die Biegeebene beschreibt die Lage der einzelnen Konturelemente zueinander.

Die Untersuchung der möglichen Einflussgrößen beschränkt sich in dieser Arbeit auf das Biegen von Bögen, deren Biegeradius und Biegeebene konstant bleibt. Deshalb wird der Umfang dieses Qualitätskriteriums auf die Messung der Abweichung des Ist-Radius vom Soll-Radius und des Ist-Winkels vom Soll-Winkel eingeschränkt.

Das Biegen eines Bogens mit konstantem Biegeradius und konstanter Biegeebene stellt eine sehr wichtige Voraussetzung für das Biegen von komplexen dreidimensionalen Konturen dar, wofür die Versuchseinrichtung HexaBend prädestiniert ist. Darunter sind solche Biegekonturen zu verstehen, bei denen sich der Biegeradius und die Biegeebene kontinuierlich verändern (siehe Abbildung 5).



*Abbildung 5: Biegen eines Teiles, bei dem sich Biegeradius und die Biegeebene kontinuierlich verändern [IWU2013]*

In der Prozessplanungssoftware ProTUBA erfolgt eine Diskretisierung dieser Raumkurven, indem sie in eine Aneinanderreihung von kurzen Kreisbogenstücken mit sich unterscheidenden Biegeradien und Biegeebenen umgewandelt werden. Für jedes dieser Kreisbogenstücke wird ein konstanter Radius angenommen, was - über den Verlauf betrachtet – letzten Endes einen kontinuierlich veränderlichen Radius erzeugt. Auf ein kompliziertes mathematisches Modell zur Beschreibung der Raumkurve wird bewusst verzichtet.

Die Erkenntnisse, die aus dem Biegen eines konstanten Radius hervorgehen, können als Grundlage für das Biegen von kontinuierlich veränderlichen Radien

benutzt werden. Wenn die Abweichung des Ist-Radius vom Soll-Radius und des Ist-Winkels vom Soll-Winkel bei dem Biegen eines konstanten Radius in der Toleranz liegt ist es anzunehmen, dass dies auch bei der Aneinanderreihung konstanter Radien der Fall sein wird. Dieser Zusammenhang lässt sich aus einem früheren Versuch ableiten, bei dem eine „Viviani-Kurve“ erfolgreich gebogen wurde [IWU2012]-(Kapitel 6).

Für die Bewertung des Biegeergebnisses anhand dieses Qualitätskriteriums ist die Abweichung des Ist-Radius vom Soll-Radius und des Ist-Winkels vom Soll-Winkel messtechnisch zu erfassen.

#### 2.1.4 Querschnittsdeformationen

Dieses Qualitätskriterium unterteilt sich in die drei zu untersuchenden Erscheinungen:

- Ovalisierung (siehe Abbildung 6)
- Einfall (siehe Abbildung 7) und
- Falten.

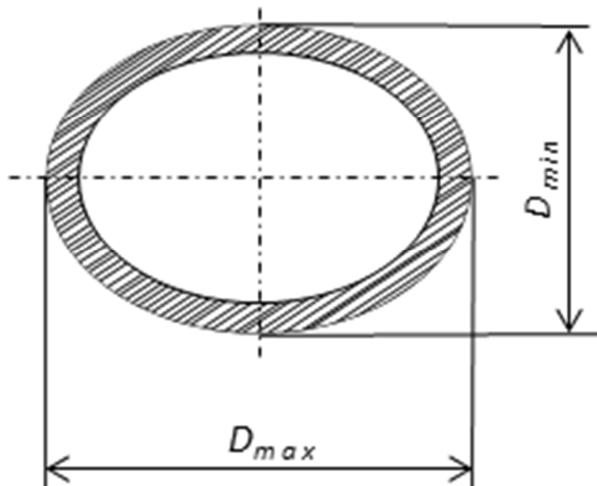


Abbildung 6: Maximaler und minimaler Außendurchmesser eines ovalisierten Profilquerschnittes



Abbildung 7: Einfall des Profilquerschnittes

Die Ovalisierung des Profilquerschnittes, auch Unrundheit genannt, erstreckt sich meist über die gesamte umgeformte Kontur des Biegeteiles. Sie entsteht vor allem bei dem Durchlauf des Biegehalbzeuges durch die Gleitführung des beweglichen Werkzeuges. An dieser kleinen Kontaktfläche wird ein hoher Druck aufgebaut. Er wird aufgrund des Hebelgesetzes mit steigendem Werkzeugabstand kleiner. Ein kleinerer Druck führt wiederum zur Abnahme der Ovalisierung. Nachteilig daran ist jedoch, dass der minimal erzeugbare Biegeradius größer wird. [IWU2012]

Die Unrundheit  $u$  berechnet sich nach der folgenden Formel (siehe [VDI-Entwurf2011]-(Kapitel 7.1.3)). Zur Veranschaulichung der Maßeintragungen siehe Abbildung 6 und Abbildung 8.

$$u = \left( \frac{H_Q - H_R}{H} \right) * 100\% \quad (1)$$

$H_Q$  ... Profilhöhe senkrecht zur Biegeebene (entspricht größter gemessener Außendurchmesser  $D_{max}$ )

$H_R$  ... Profilhöhe in der Biegeebene (entspricht kleinster gemessener Außendurchmesser  $D_{min}$ )

$H$  ... Profilhöhe (entspricht dem Nennaußendurchmesser  $D$ )

Das Biegeergebnis wird unter Zuhilfenahme der Ovalisierung quantitativ bewertet. Eine Ovalisierung des Profilquerschnittes entsteht bei dem Freiform-Druckbiegen in den meisten Fällen, deshalb ist die Begrenzung dieser auf ein tolerierbares Maß in Abhängigkeit vom Einsatzzweck des Biegeteiles wichtig.

Unter dem Einfall des Profilquerschnittes ist eine durch den Biegeprozess hervorbrachte Absenkung des dessen in Richtung der Profillängsachse (in Abbildung 8 mit Schwerpunktachse bezeichnet) zu verstehen. Diese tritt ausschließlich am Innenbogen des Biegeteiles auf und ist lokal begrenzt.

Die Abbildung 8 zeigt die Geometriedefinitionen am Beispiel eines idealen Rohrbogens.

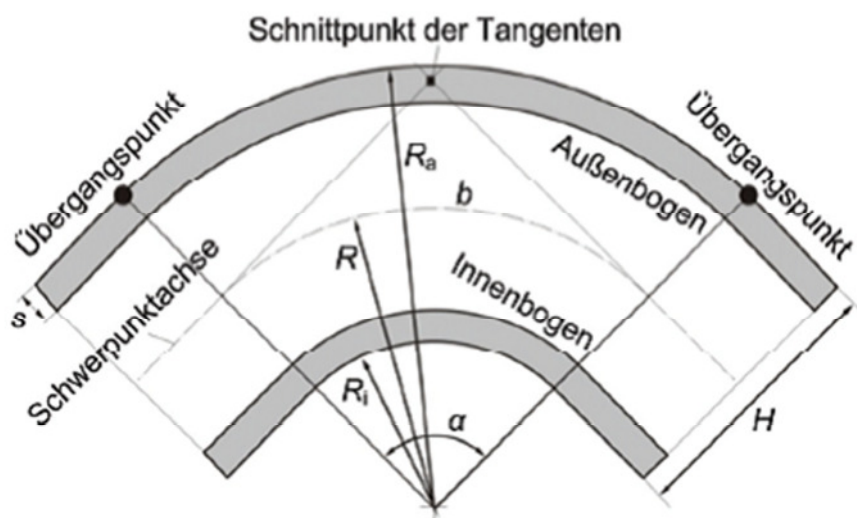


Abbildung 8: Geometriedefinitionen am Beispiel eines idealen Rohrbogens [VDI-Entwurf2011]

Der Einfall des Profilquerschnittes sowie Falten sind eindeutig durch Sichtprüfung erkennbar und werden somit qualitativ beurteilt.

Eine zusätzliche Art der Querschnittsdeformation stellt die Einschnürung des Profilquerschnittes dar. Diese entsteht am Anfang und am Ende eines Biegebogens aufgrund einer ruckartigen Bewegung des beweglichen Werkzeuges, die zu einem sprunghaften Anstieg bzw. Abfall der Druckkraft auf den an der Gleitführung des

beweglichen Werkzeuges anliegenden Teil des Profilquerschnittes führt. Die Einschnürung erstreckt sich ca. über 1 – 2 cm in Profillängsrichtung und ist auf ca. die Hälfte des Profilumfanges begrenzt.

Im Rahmen dieser Arbeit wird dieser Effekt nicht berücksichtigt, weil eine deutliche Minimierung dieser Einschnürung in Zukunft durch Hinzufügen eines Einlaufbereiches in die Biegestrategie erreicht werden könnte.

## 2.2 Messmittel und Vorgabe von Toleranzbereichen

Zur quantitativen Beurteilung der erzielten Biegeergebnisse sind verschiedene Messmittel nötig. Die Tabelle 1 zeigt die für die Auswertung zur Verfügung stehenden Messmittel:

*Tabelle 1: Übersicht über die vorhandenen Messmittel*

	Manuelles Messen				Automatisiertes Messen	
Bezeichnung	Maßband	Messschieber	Radienmessbrücke	mobiles Koordinatenmessgerät	3D-Koordinatenmessmaschine	3D-Digitalisierer
Messgröße	Anfangs- / Endlänge	Ovalisierung	Biegeradius am Außenbogen	Biegewinkel, Biegeradius Außen-/ Innenbogen	alle Längen und/oder Koordinaten	alle Längen und/oder Koordinaten
Messgenauigkeit	$\pm 0,2mm$	$\pm 0,05mm$	-	$\pm 0,025mm$ (Einzelpunktantastung)	-	-

Bei der Kleinserienfertigung von Biegeteilen in der industriellen Praxis unterscheidet sich die Bewertung des Biegeergebnisses in die zwei Varianten Prüfen und Messen:

- 1) Die Prüfung des Biegeergebnisses erfolgt üblicherweise mithilfe von Schablonen oder Biegeteillehren. Biegeteillehren sind speziell angefertigte Vor-

richtungen zum Einlegen und fixieren der Biegeteile, die aus mehreren Auflageflächen bestehen. Damit können auch dreidimensionale Biegekonturen geprüft werden. Das Biegeteil muss an bestimmten kritischen Stellen genau passen. [VDI-Entwurf2011]

Handelt es sich um eine zweidimensionale Kontur, genügt oft das Auflegen des Biegeteiles auf eine Schablone oder auf eine im Maßstab 1:1 ausgedruckte Fertigungszeichnung. [VDI-Entwurf2011]

Bei dem Prüfen des Biegeteiles erfolgt lediglich eine qualitative Unterscheidung in Gutteil oder Ausschussteil. Es werden keine Messwerte aufgenommen, somit kann auch die Abweichung der Ist-Kontur von der Soll-Kontur nicht quantifiziert werden. Das Prüfen wird meistens während der laufenden Produktion praktiziert. [VDI-Entwurf2011]

- 2) Das Messen des Biegeergebnisses kann mithilfe vieler verschiedener Messmittel erfolgen. Einige davon sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Eine grobe Einteilung dieser kann dabei in manuelles und automatisiertes Messen erfolgen. Bei dem manuellen Messen führt der Bediener den Messvorgang aktiv aus. Im Gegensatz dazu läuft bei dem automatisierten Messen der Messprozess automatisiert ab, das Biegeteil muss lediglich von Hand in die Messmaschine eingelegt bzw. eingespannt werden. Es besteht auch die Möglichkeit einer automatischen Zuführung des Biegeteiles. [VDI-Entwurf2011]

Eine Möglichkeit des manuellen Messens ist das Erfassen der Biegekontur mithilfe eines mobilen Koordinatenmessgerätes. Dabei kann das freie Endsegment des Messarmes mit einem taktilen oder berührungslosen Messkopf bestückt werden. Die Messung erfolgt somit entweder durch das Abtasten oder das Einscannen der Biegekontur. Die Ergebnisse dieser Messung werden danach mit dem CAD-Modell des Biegeteiles verglichen, daraus lassen sich dann die Abweichungen der Ist-Kontur von der Soll-Kontur quantifizieren und somit die Maschinenparameter anpassen. So wird in der



industriellen Praxis oft vor Beginn der Serienfertigung zum Einrichten der Biegemaschine vorgegangen. [VDI-Entwurf2011]

Im Rahmen dieser Arbeit ist es in den meisten Fällen erforderlich Messungen durchzuführen, um somit die Signifikanz verschiedener Einflussgrößen auf das Biegeergebnis herauszustellen. Deshalb eignet sich die Prüfung mithilfe von Biegeteillehren oder Schablonen nur bedingt.

Die Festlegungen, welches Messmittel für die Bewertung welcher Einflussgröße benutzt wird, erfolgen im Kapitel 3.2: Erstellung der Versuchspläne.

Um bestimmen zu können, ob ein Biegeteil ein Gutteil oder Ausschussteil ist, müssen die Messwerte innerhalb einer Toleranz liegen. Diese ist je nach Anwendungsfall des Biegeteiles und damit je nach erforderlicher Qualität, entweder vom Kunden auf der Fertigungszeichnung vorgegeben, oder sie muss auf Basis von Erfahrungen selbst festgelegt werden. Als Beispiel für erlaubte Toleranzen in der industriellen Praxis zeigt die folgende Abbildung 9 einen Auszug aus der Werksnorm der Firma Schuster Rohrbogen GmbH. Die Werte werden für die Aufträge angewendet, bei denen in der Fertigungszeichnung Angaben zu Fertigungstoleranzen fehlen [Schuster2011].

Die aufgeführten Toleranzen gelten für das Maß „Rm“ (mittlerer Biegeradius).  
Massangaben bis Sollmaß „1.000“ in mm, darüber in %.

Sollmaß von bis	≤ 50	51 100	101 250	251 500	501 1000	≥ 1001
Winkel ≤ 90°	± 1,5	± 2,0	± 3,0	± 4,0	± 5,0	± 2 %
Winkel ≥ 91°	± 2,0	± 3,0	± 5,0	± 5,0	± 20,0	± 4%

*Abbildung 9: Beispiel für Toleranzen bei der industriellen Fertigung von Rohrbögen [Schuster2011]*

Eine übliche Forderung seitens der Automobilindustrie ist beispielsweise die Einhaltung einer Schlauchtoleranz von  $\pm 1,0\text{mm}$  für Biegeteile, die nachfolgend einer Innenhochdruckumformung unterzogen werden und  $\pm 0,7\text{mm}$  oder  $\pm 0,5\text{mm}$  für Biegeteile, die nicht nachfolgend umgeformt werden. Die Überprüfung der Einhal-

tung wird oft mithilfe von Biegeteillehren vorgenommen. Diese lassen eine Abweichung der Ist-Kontur des Biegeteiles von der Soll-Kontur innerhalb der gegebenen Schlauchtoleranz zu. Es wird ein virtueller Schlauch um das Biegeteil gelegt, innerhalb dessen die Kontur liegen muss. Die Lage der Anlagepunkte ist unter Berücksichtigung dieser Schlauchtoleranz angeordnet. [Kumm2013]

Die Toleranz bezüglich der Ovalisierung des Biegeteiles wird in vielen Fertigungszeichnungen mit maximal fünf Prozent angegeben. Toleranzen für die Oberflächengüte und andere Querschnittsdeformationen wie Faltenbildung oder der Einfall des Profilquerschnittes werden meist unter der Forderung „frei von Falten, Ziehriefen und Spannabdrücken“ zusammengefasst. [Kumm2013]

Für die Wiederholgenauigkeit von Bogen zu Bogen wird in dieser Arbeit eine Obergrenze von drei Prozent festgelegt (siehe Kapitel 5.2 und 5.3).

## 2.3 Randbedingungen der Versuchseinrichtung HexaBend

Die Versuchseinrichtung verfügt über eine relativ große zulässige Kraft pro Strebe, welche auch das Biegen von höherfesten, dickwandigen Biegehalbzeugen erlaubt (siehe Tabelle 2). Es können viele verschiedene Profilquerschnitte, egal ob runde oder eckige Voll- und Hohlprofile mit offenem oder geschlossenem Profilquerschnitt, gebogen werden.

*Tabelle 2: Die wichtigsten Leistungsdaten der Versuchseinrichtung im Überblick*

Nennaußendurchmesser des Biegehalbzeuges	$25\text{ mm} < D < 100\text{ mm}$
Wanddicke des Biegehalbzeuges	$1\text{ mm} < s < 5\text{ mm}$
max. Länge des Biegehalbzeuges	2500mm
zul. Vorschubkraft des Pushers	125 kN
zul. Kraft pro Strebe	100 kN
zul. Kraft der Dornpositioniereinrichtung	25 kN
max. Ausbringung der Versuchseinrichtung	2 – 3 Teile pro Minute

Der Ausgangspunkt bei dieser Arbeit war das Vorhandensein des entsprechenden Werkzeugsatzes (Gleitführung des feststehenden und beweglichen Werkzeuges und Biegedorn, siehe Abbildung 10) für Rohre mit einem Außendurchmesser von  $65\text{ mm}$  und einer Wanddicke von  $2\text{ mm}$ . Deshalb werden die Versuchsreihen mit diesem Biegehalbzeug durchgeführt. Ein Biegehalbzeug mit diesen Abmessungen und diesem Profilquerschnitt zu verwenden, stellt keine notwendige Randbedingung dar, es bot sich aber - aufgrund des aktuell montierten Werkzeugsatzes und zur Nutzung von Erkenntnissen aus vorherigen Versuchen - für diese Arbeit an.

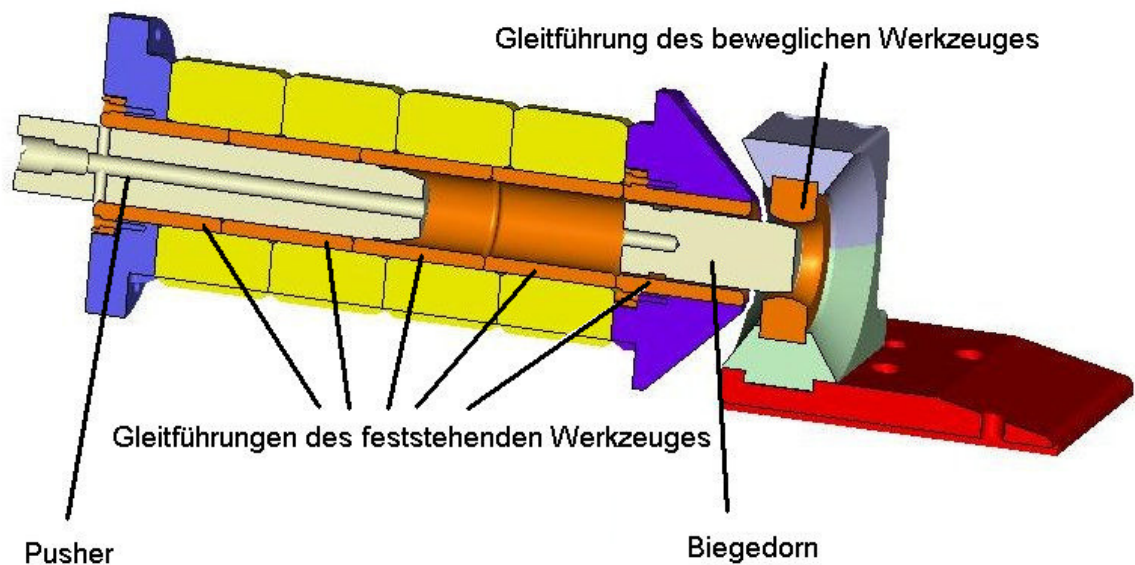


Abbildung 10: Schnitt des CAD-Modells des eingesetzten Werkzeugsatzes [IWU2013]

Um Querschnittsdeformationen des Profilquerschnittes bei kleinen Biegeradien und Biegewinkeln möglichst gering zu halten, kann ein Biegedorn, welcher über eine CNC-Achse positioniert werden kann, Abhilfe schaffen. Weitere Zusatzmodule der Versuchseinrichtung, wie die Möglichkeit zur induktiven Erwärmung des Biegehalbzeuges, der biegevorgelagerten Querschnittsformung oder des werkzeugintegrierten Schmierstoffsprühsystems, versprechen ein hohes Maß an Flexibilität und Funktionalität (siehe Abbildung 11).

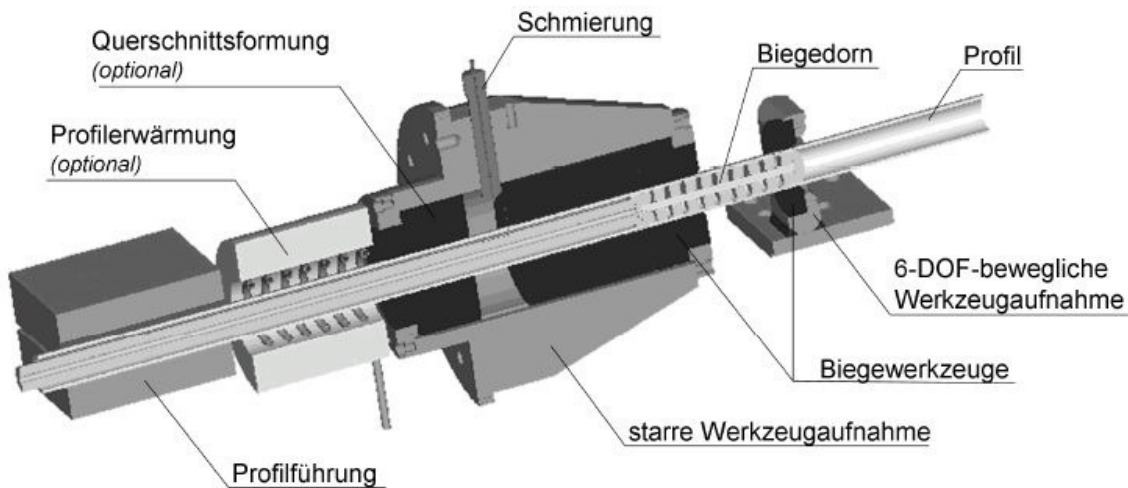


Abbildung 11: Umformkomponenten der Versuchseinrichtung [IWU2013]

Die Positioniergenauigkeit des beweglichen Werkzeuges gehört ebenfalls zu den wichtigen Randbedingungen der Versuchseinrichtung HexaBend. Sie unterteilt sich in die statische Positioniergenauigkeit und die Bahngenauigkeit und hat eine große Bedeutung, um die Abweichung der Ist-Kontur von der Soll-Kontur zu minimieren.

Die statische Positioniergenauigkeit gibt „...die Abweichung der Ist-Position (= der angefahrenen Position) von der Sollposition (= der programmierten Position) beim Anfahren eines numerisch programmierten Punktes an.“ [smerobot2008]. Dabei liegt der systematische Fehler laut Betreiberaussage bei ca.  $0,1 - 0,2 \text{ mm}$ , und die Wiederholgenauigkeit bei  $0,01 - 0,02 \text{ mm}$ .

Für die Bahngenauigkeit wird ermittelt, „...wie genau ein Roboter eine vorgegebene Ablaufbewegung bei festgelegter Geschwindigkeit einhält.“ [smerobot2008]. Die tatsächlich gefahrene Bahn kann signifikant von der programmierten Bahn abweichen. Wie groß diese Abweichung ist, wird derzeit ermittelt und muss während dieser Arbeit als Störgröße angesehen werden.

Grundsätzlich lässt sich sagen, dass die Positionierung des beweglichen Werkzeuges einem Fehler unterliegt, welcher sich unter anderem aus jeder einzelnen Regelabweichung der sechs hydraulischen Streben zusammensetzt. Durch das komplexe Zusammenspiel der sechs Streben während des Biegeprozesses ist von

den Regelabweichungen der einzelnen Streben jedoch nicht ohne weiteres auf den resultierenden Positionsfehler des beweglichen Werkzeuges zu schließen.

In der Abbildung 12 sind die Auswirkungen auf die Positioniergenauigkeit des beweglichen Werkzeuges zusammengefasst, die bei der Variation der zwei ausgewählten Prozessparameter zu erwarten sind. Dabei ist besonders von Interesse, wie Effekt 1 und Effekt 2 jeweils im Verhältnis stehen. Zum Beispiel ist es möglich, dass bei der Variation eines Prozessparameters die Auswirkungen des einen Effektes auf die Regelabweichung der Streben und somit für das Biegeergebnis vernachlässigbar gering gegenüber denen des anderen Effektes sind.

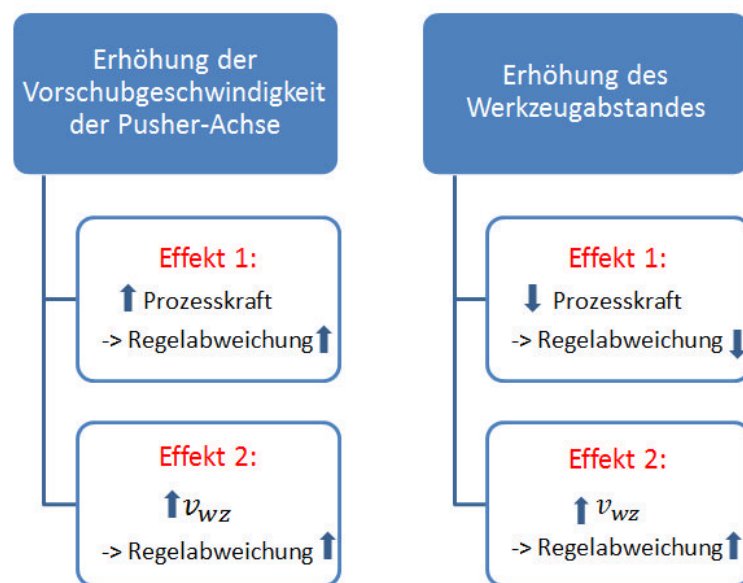


Abbildung 12: Zu erwartende Auswirkungen auf die Regelabweichung der Streben bei Variation dieser ausgewählten Prozessparameter

### 3 Vorgehensweise

Nachfolgend soll eine Vorgehensweise zur Lösung der Aufgabenstellung entwickelt werden. Im ersten Schritt steht dabei die Diskussion um eine sinnvolle Einschränkung des Untersuchungsumfanges möglicher Einflussgrößen im Vordergrund. Hierbei sind die folgenden Fragestellungen systematisch zu klären:

- Für welche Einflussgrößen sind experimentelle Untersuchungen notwendig und auch realisierbar?
- Über welche Einflussgrößen lassen sich Aussagen oder Festlegungen bezüglich deren Signifikanz mit Hilfe von Erfahrungen oder Erkenntnissen aus bereits durchgeführten Versuchen oder aus anderen Quellen treffen?
- Wie kann man eine Zusammenfassung der Versuche vornehmen, um mit möglichst wenig Materialeinsatz die gewünschten Erkenntnisse zu erhalten?

Im zweiten Schritt soll schließlich die Aufstellung eines konkreten Versuchsplanes erfolgen. Darin sollen die folgenden Informationen enthalten sein:

- Zielgröße(n)
- Zielstellung des Versuches
- Versuchsbedingungen
- Einflussgrößen, unterteilt in Steuer- und Störgrößen
- Materialbedarf
- Messgrößen und dazu geeignete Messmittel

#### 3.1 Einschränkung des Betrachtungsraumes

Die Abbildung 13 stellt eine Übersicht der Einflussgrößen auf den Biegeradius bei dem Drei-Rollen-Schubbiegen von Rohrprofilen dar. Da es sich dabei um ein Freiformbiegeverfahren handelt welches prinzipiell dem Freiform-Druckbiegen mit der Versuchseinrichtung HexaBend sehr ähnlich ist, kann diese Übersicht durchaus

als Ausgangspunkt für die Bewertung der Signifikanz der Einflussgrößen genutzt werden (siehe [Gerlach2010]-(Kapitel 2)).

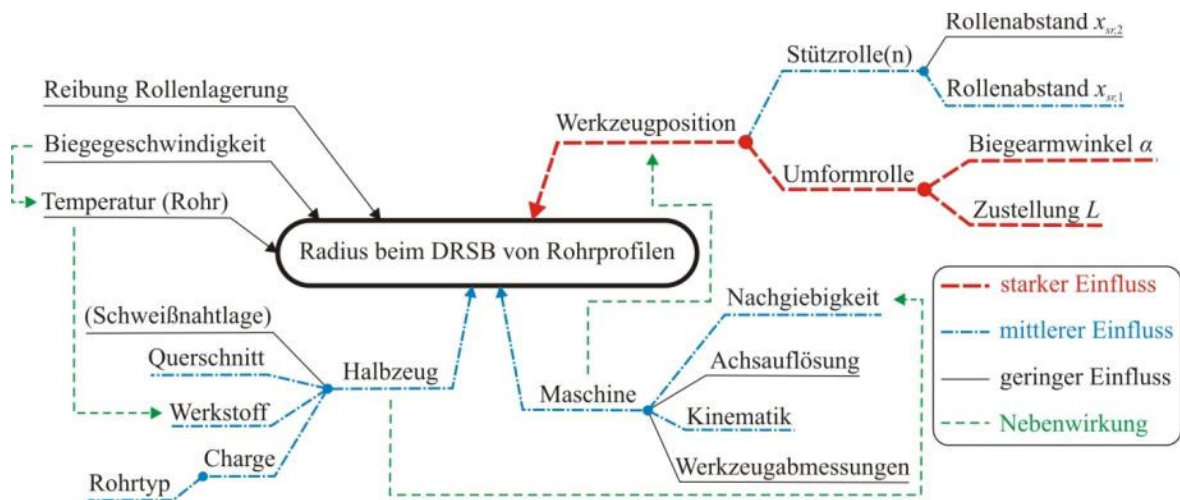


Abbildung 13: Einflussgrößen auf den Biegeradius bei dem Drei-Rollen-Schubbiegen von Rohrprofilen [Kersten2012]

Zunächst einmal erfolgt eine Ausgrenzung jener Einflussgrößen, die nicht experimentell untersucht werden. Zusätzlich dazu gibt es noch andere Einflussgrößen, die ebenfalls einen signifikanten Einfluss auf das Biegeergebnis haben, jedoch nicht in dieser Arbeit untersucht werden können. Dazu zählt zum Beispiel die Rubrik „Halbzeug“ (siehe Abbildung 13). Für die experimentellen Versuche wurde sich auf nur ein Biegehalbzeug festgelegt (siehe Kapitel 3.2).

### 3.1.1 Einfluss von Reibverhältnissen

Der Einfluss von Reibverhältnissen auf das Biegeergebnis kann im Rahmen dieser Arbeit nur minimal beleuchtet werden. Die Reibverhältnisse werden in den Versuchen als Störgröße angesehen, da ihr Einfluss auf den Fertigungsprozess nicht speziell untersucht wird, jedoch in bestimmten Fällen signifikant sein kann.

Bei den experimentellen Untersuchungen wird die Außenseite des Biegehalbzeuges nach dem Einlegen in die Traverse mit dem Schmierstoff „WD-40“ (Firma: WD-40 Company) rundum benetzt. Dies vermindert die Gleitreibung zwischen

dem Biegehalbzeug, und den Gleitführungen des feststehenden und beweglichen Werkzeuges. Der Auftrag einer größeren Menge des Schmierstoffes trägt nicht zur Verminderung der Gleitreibung bei, denn das feststehende Werkzeug streift beim Durchlauf des Biegehalbzeuges den Großteil des aufgetragenen Schmierstoffes wieder ab. In früheren Untersuchungen zur Wahl des optimalen Schmierstoffes stellte sich heraus, dass bei der Verwendung von Schmierstoffen höherer Viskosität die gemessenen Vorschubkräfte am Pusher- und Strebenantrieb kleiner sind als bei der Verwendung von Schmierstoffen geringerer Viskosität (siehe [Lorenz2004]-Kapitel 3.6).

Außerdem wurden Rauheitsmessungen an den Bauteiloberflächen von Biegeteilen vor und nach der Umformung durchgeführt. Verfahrensbedingt führt das Abgleiten der Profilumfangsfläche an den Gleitführungen des beweglichen und des feststehenden Werkzeuges zu einer Glättung der Bauteiloberfläche. Voraussetzungen für diese positive Begleiterscheinung des Freiform-Druckbiegens sind jedoch saubere Biegehalbzeuge sowie saubere und verschleißfreie Biegewerkzeuge. (siehe [Lorenz2004]-(Kapitel 3.6))

### **3.1.2 Lage der Schweißnaht**

Aufgrund des Wärmebehandlungszustandes des gegebenen Biegehalbzeuges (lösungsgeglüht) und des bereits bei dem Drei-Rollen-Schubbiegen festgestellten geringen Einflusses (siehe Abbildung 13) ist nicht zu erwarten, dass die Lage der Schweißnaht einen signifikanten Einfluss auf das Biegeergebnis darstellt. Aus diesem Grund wird von einer experimentellen Bestimmung eines möglichen Einflusses auf das Biegeergebnis abgesehen.

Um diese Erwartung zu bestätigen, wurden Zugversuche an Zugproben mit Schweißnaht und an Zugproben ohne Schweißnaht durchgeführt (siehe Anlage - Zugproben). Die Ergebnisse sind in Abbildung 14 dargestellt. Darin konnte eindeutig festgestellt werden, dass sich die aus den Zugproben mit Schweißnaht ermittelten Kennwerte nicht von denen ohne Schweißnaht unterscheiden.



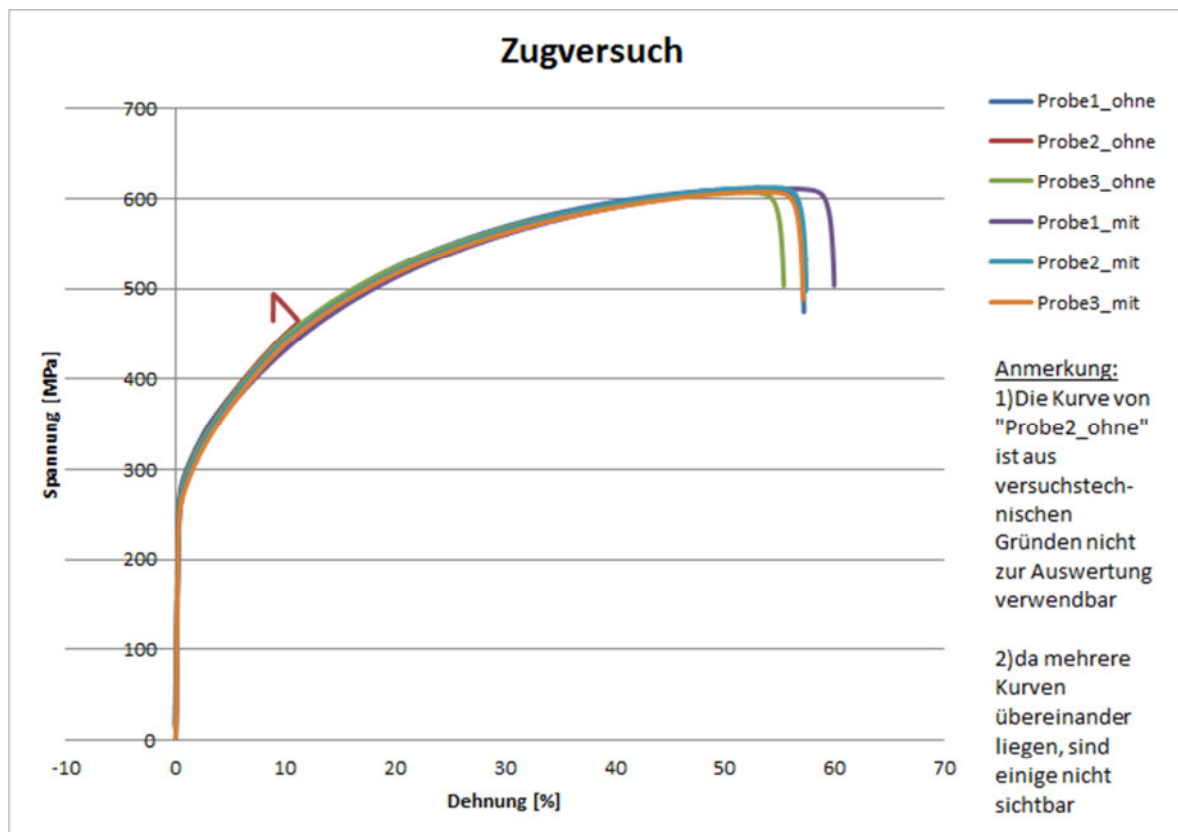


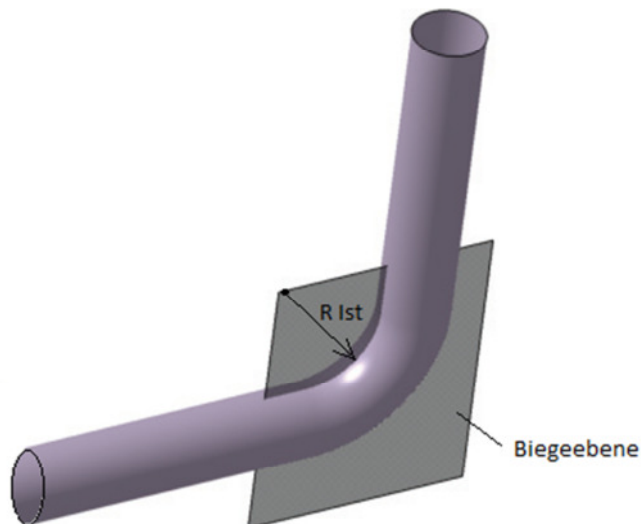
Abbildung 14: Zugversuche für die Bestimmung des Einflusses der Lage der Schweißnaht auf das Biegeergebnis

Trotz dieses Ergebnisses wird während dem Einlegen des Biegehalbzeuges in die Maschine stets darauf geachtet, dass die Schweißnaht nach oben zeigt. Somit liegt sie nach dem Biegen am Innenbogen des Biegeteiles und es wirkt lediglich Druckspannung auf sie.

### 3.1.3 Gestalt/ Abfolge der Konturelemente

Unter der Gestalt der Konturelemente kann man in diesem Zusammenhang verstehen, wie die geometrischen Eigenschaften des Biegeteiles beschaffen sein sollen. Dabei geht es vor allem um die Biegeebene und den Biegeradius. Es lassen sich mit der Versuchseinrichtung HexaBend Raumkurven fertigen, bei denen sich die Biegeebene und der Biegeradius kontinuierlich verändern. Für die Versuche in dieser Arbeit wird auf diese komplexe Geometrie verzichtet - es werden aus-

schließlich Biegeteile gefertigt, bei denen die Biegeebene und der Biegeradius konstant bleibt (siehe Abbildung 15).



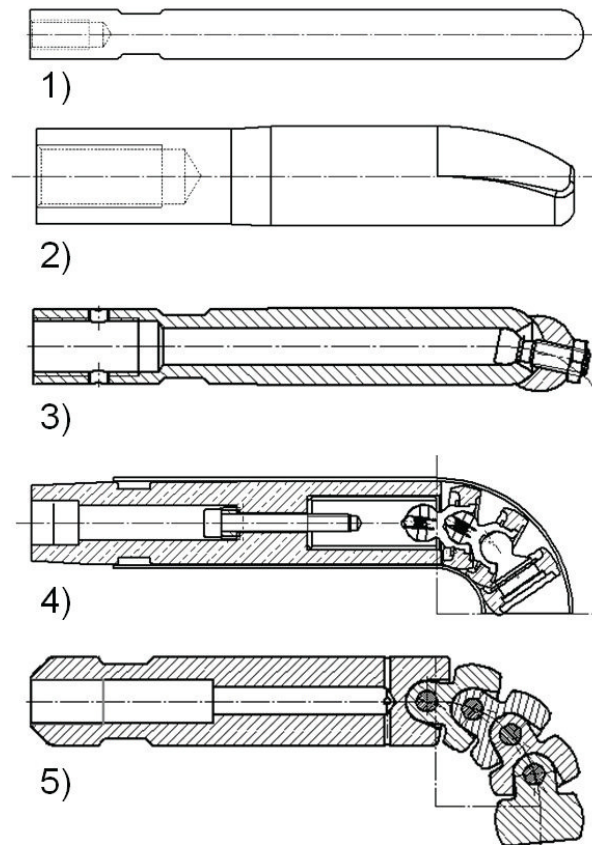
*Abbildung 15: Biegeteil mit konstanter Biegeebene und konstantem Biegeradius*

Die Abfolge der Konturelemente kann prinzipiell auch einen Einfluss auf das Biegeergebnis haben. So können zum Beispiel bei einer Bogen-in-Bogen-Kontur durch einen vorhergegangenen Bogen Spannungen in den Werkstoff eingebracht werden, welche den Widerstand des Werkstoffes gegen Verformung bei dem nachfolgenden Bogen aufgrund der Werkstoffverfestigung signifikant beeinflussen. Aus diesem Grund wird die Abfolge der Konturelemente in dieser Arbeit auf Gerade-Bogen-Gerade beschränkt. Durch die Zwischengerade wird ein Abstand zum folgenden Bogen geschaffen, welcher die Beeinflussung minimieren sollte.

### **3.1.4 Biegen ohne Dorn/ Biegen mit Dorn**

Ein Biegedorn wird üblicherweise bei Biegehalbzeugen mit relativ kleiner Wanddicke und/ oder kleinen Soll-Radien verwendet. Er kann Querschnittsdeformationen

verhindern, da er das Biegeteil in der Umformzone von innen stützt. Es gibt verschiedene Arten von Biegedornen, die in der folgenden Übersicht dargestellt sind:



*Abbildung 16: Arten von Biegedornen: 1 Fingerdorn; 2 Löffeldorn; 3 Kugeldorn; 4 Kugelinggelenkdorn; 5 Kugelgelenkdorn [VDI-Entwurf2011]*

Der Einsatz von Dornwerkzeugen beim Freiformbiegen von Rundrohren ist in der industriellen Praxis durchaus möglich und wird zum Beispiel bei der Firma ThyssenKrupp Steel AG in Duisburg angewendet. Es werden überwiegend Gliederdorne eingesetzt, was jedoch mitunter von der Biegeisometrie abhängt. Demnach wird der Einsatz von anderen Dornformen, wie zum Beispiel dem Elastomerdorn ebenfalls praktiziert. Bei dem Biegen mit Hilfe eines Biegedornes hat das optimale Zusammenspiel von Dorn- und Werkzeugstellung für das Biegeergebnis eine entscheidende Bedeutung. Ist diese nicht gegeben, kann es zu dem Aufstauchen

oder Abknicken des Biegehalbzeuges kommen. [Groth2013]; [Kibben2005]-(Kapitel 4)

Daraus folgend stellt das Biegen mit einem Dorn ein komplexes Feld dar, welches im begrenzten Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht werden kann.

Nachfolgend werden die Einflussgrößen näher beschrieben, welche experimentell untersucht werden.

### 3.1.5 Änderung der Prozessgeschwindigkeit

Die Geschwindigkeit des Biegeprozesses wird in Abhängigkeit von der Vorschubgeschwindigkeit der Pusher-Achse  $v_{fP}$  geregelt. Diese ist in der Prozessplanungssoftware „ProTUBA“ durch den Bediener vorzugeben.

Frühere Untersuchungen diesbezüglich zeigten, dass die Erhöhung der Prozessgeschwindigkeit eine ungenauere Positionierung des beweglichen Werkzeuges im Raum zur Folge hat. Diese Feststellung gilt sowohl im unbelasteten als auch im belasteten Zustand des beweglichen Werkzeuges. (siehe [Lorenz2004]-(Kapitel 4.1))

Ursachen dafür sind unter anderem:

- das begrenzte Beschleunigungs- und Reaktionsvermögen des Antriebes
- die Ungenauigkeit der Positionsmessung
- das stark nichtlineare Regelungsverhalten der hydraulischen Achsen
- die möglicherweise nicht optimale Einstellung des Reglers.

Des Weiteren konnte festgestellt werden, dass im belasteten Zustand des beweglichen Werkzeuges die Änderung der Vorschubgeschwindigkeit unter sonst konstanten Rahmenbedingungen keine wesentliche Auswirkung auf die Größe der Vorschubkraft hat, die der Elektromotor des Pusher-Antriebes aufbringen muss (siehe [Lorenz2004]-(Kapitel 4.1)).

Es lässt sich jedoch, selbst wenn sich dies bestätigen sollte, noch keine Aussage über die Größe der wirkenden Kräfte auf die Gleitführung des beweglichen Werkzeuges treffen. Um den Einfluss der Größe der Prozessgeschwindigkeit auf den Biegeprozess umfassend herauszustellen wäre die Messung der Prozesskräfte zwar nötig, es wird jedoch in dieser Arbeit aufgrund der begrenzten Bearbeitungszeit davon abgesehen.

Nachfolgend wird als Ausgangspunkt genommen, dass die Positionierungenauigkeit nicht nur die Folge des Kraftanstieges auf die Parallelkinematik ist, sondern vor allem aus der schnelleren Bewegung an sich resultiert. Daraus lässt sich ableiten, dass die Qualitätskriterien Abweichung der Ist-Kontur von der Soll-Kontur und Wiederholgenauigkeit voraussichtlich das Prozessfenster für die maximal einstellbare Prozessgeschwindigkeit nach oben begrenzen werden. Diese Begrenzung ist nicht absolut, sondern nur im Zusammenhang mit den Versuchsbedingungen zu sehen, welche in der Versuchsplanung festgelegt wurden.

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen ist nun zu klären, wie stark der Einfluss der Prozessgeschwindigkeit auf das Biegeergebnis ist. Speziell für das gegebene Biegehalbzeug ist dabei ein sicheres Prozessfenster zu ermitteln. Von Interesse ist vor allem die obere Grenze der Prozessgeschwindigkeit, weil diese in der industriellen Praxis eine Steigerung der Produktivität bedeutet.

### **3.1.6 Variation des Werkzeugabstandes**

Der Werkzeugabstand gibt in diesem Falle an, wie groß der Abstand (Bogenlänge) des beweglichen Werkzeuges zum feststehenden Werkzeug ist. Dieser wird entlang der Rohrmittellinie vom Austritt des Biegehalbzeuges aus dem feststehenden Werkzeug bis zur Mitte des beweglichen Werkzeuges gemessen (siehe Abbildung 17).

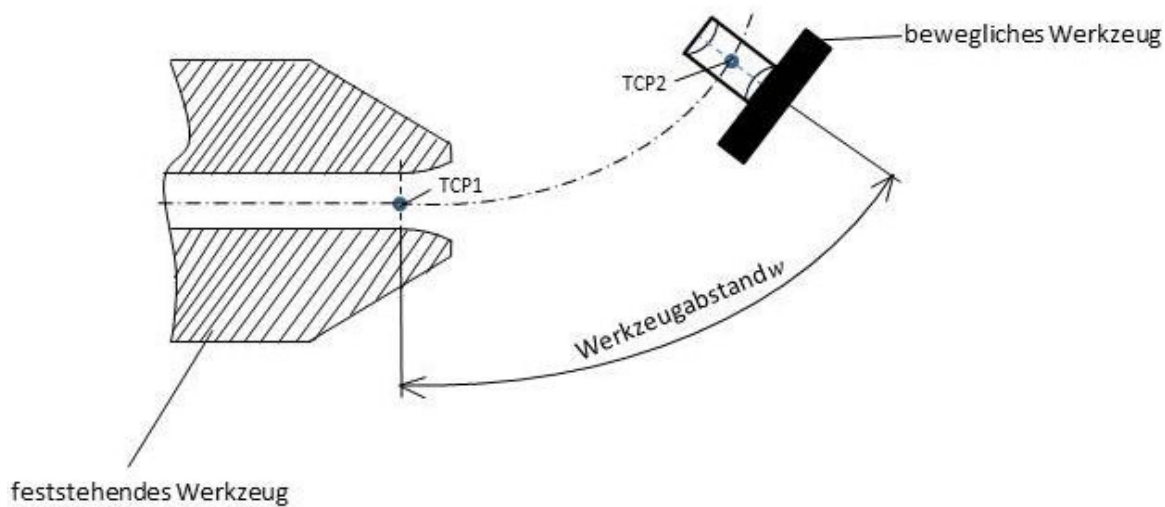


Abbildung 17: Lage des Werkzeugabstandes  $w$

Nach bisherigem Kenntnisstand hat die Variation des Werkzeugabstandes einen signifikanten Einfluss auf den minimal bzw. maximal erzeugbaren Biegeradius und auf den Grad der Ovalisierung. Je größer der Werkzeugabstand, desto kleiner der Grad der Ovalisierung. Desto größer wird jedoch gleichzeitig der minimal erzeugbare Biegeradius. [IWU2012]-(Kapitel 5)

Die zu erwartenden Auswirkungen auf die Positioniergenauigkeit des beweglichen Werkzeuges und somit auf die Abweichung der Ist-Kontur von der Soll-Kontur wurden bereits am Ende des zweiten Kapitels beschrieben und sollen – wenn möglich – in den Versuchen herausgestellt werden (siehe Abbildung 12).

### 3.1.7 Minimaler/ Maximaler Biegefaktor

Der Biegefaktor  $B$  beschreibt das Verhältnis vom Biegeradius  $R$  zum Rohraußendurchmesser  $D$ . In den Leistungsdaten der HexaBend-Maschine wird ein theoretisch möglicher Bereich des Biegefaktors von  $2 \leq B \leq \infty$  angegeben [Neugebauer2001]. In der Praxis wird das Freiformbiegen zumeist für die Herstellung von Biegeteilen mit größeren Biegefaktoren ( $B \geq 5$ ) angewendet (siehe [Gerlach2010]-(Kapitel 2)).

Ausgehend davon ist die Untersuchung von Biege Faktoren  $B < 5$  nicht vorrangig von Bedeutung. Aufgrund des herauszustellenden Einflusses der Variation des Werkzeugabstandes auf das Biegeergebnis ist es in dieser Arbeit jedoch sinnvoll, dies zu untersuchen.

Erste Biegeversuche mit diesem Biegehalbzeug im Jahre 2012 lieferten bei einem Werkzeugabstand von  $100\text{ mm}$  ab einem Biegeradius von ca.  $R_{\text{Ist}} \geq 360\text{ mm}$  Biegeteile, bei denen neben der gegebenen Reproduzierbarkeit keine signifikanten Querschnittsdeformationen festzustellen waren. Das entspricht einem Biegefaktor von  $B \geq 5,5$ . [IWU2012]-(Kapitel 5)

Im Rahmen der experimentellen Versuche wird überprüft, ob es durch die Verringerung des Werkzeugabstandes möglich ist, diesen Biegefaktor zu unterschreiten und somit die untere Grenze eines sicheren Prozessfensters für das gegebene Biegehalbzeug zu bestimmen. Dabei ist zu erwarten, dass es aufgrund der starken Anstellung des beweglichen Werkzeuges, die für die Herstellung kleiner Biegeradien nötig ist, eine erhöhte Wahrscheinlichkeit für das Eintreten des Versagensfalles bzw. starker Querschnittsdeformationen gibt.

Der maximal erzeugbare Biegefaktor ist zwar theoretisch mit dem Wert unendlich angegeben, praktisch jedoch gibt es natürlich einen oberen Grenzwert. Dieser lag in den vorherigen Versuchen mit dem verwendeten Biegehalbzeug bei ca.  $R_{\text{Soll}} = 1000\text{ mm}$ . Dieser Grenzwert gilt jedoch nur für einen Werkzeugabstand von  $100\text{ mm}$ . Größere Biegeradien konnten nicht mehr reproduzierbar gefertigt werden, wobei in diesem Falle keine zufriedenstellende Wiederholgenauigkeit erzielt wurde. [IWU2012]-(Kapitel 5)

Die Anstellung des beweglichen Werkzeuges ist ab einer bestimmten Größe des Biegeradius so gering, dass die zur Umformung in das Biegeteil eingebrachte Spannung kleiner ist als die Streckgrenze des Werkstoffes. Es wird keine plastische, sondern nur eine elastische Formänderung des Biegeteiles erzeugt. Dies hat eine vollständige Rückfederung des Werkstoffes in seine Ausgangslage zur Folge – die gewünschte Biegekontur bildet sich nicht ab. (siehe [Kersten/Engel2010]-Kapitel 4)

Durch Schwankungen der Werkstoffeigenschaften, speziell der Streckgrenze, kann es dennoch vereinzelt zu erfolgreichen Biegeergebnissen kommen. In diesem Falle muss der Biegeradius soweit heruntergeregelt werden, bis die Wiederholgenauigkeit gegeben ist. Erst dann kann dieser als maximal erzeugbarer Biegeradius betrachtet werden. Zu berücksichtigen ist außerdem, dass das genaue Messen eines sehr großen Biegeradius zusätzlich ein Problem bei der Bestimmung der oberen Prozessgrenze darstellen kann.

Es ist demzufolge außer vom eingestellten Werkzeugabstand vom jeweils verwendeten Biegehalbzeug und möglicherweise noch von anderen Einflüssen abhängig, welchen minimalen und welchen maximalen Wert der Biegefaktor annehmen kann. Der oben angegebene Bereich des Biegefaktors von  $2 \leq B \leq \infty$  ist nur als theoretisch möglicher Bereich anzusehen. Der praktisch anwendbare Bereich muss für jedes in seinen Abmessungen oder Werkstoffeigenschaften unterschiedliche Biegehalbzeug separat festgestellt werden, was zum Beispiel in dieser Arbeit durch Versuchsreihen geschieht.

### 3.2 Erstellung der Versuchspläne

Die in den Kapiteln 3.2.1 und 3.2.2 aufgestellten Versuchspläne stellen lediglich den theoretisch geplanten Ablauf der Versuchsreihen dar. Sie sollen auch für zukünftige Biegeversuche mit der Versuchseinrichtung HexaBend als Orientierung bezüglich der Vorgehensweise dienen. Es können sich während der Durchführung natürlich Abweichungen und Änderungen ergeben, die nicht planbar sind. Diese werden dann in dem jeweiligen Versuchsprotokoll festgehalten (siehe Anlage – Versuchsprotokolle V1a, V1b, V2).

Für die experimentellen Untersuchungen werden Rundrohre aus nichtrostendem Stahl mit der Legierungszusammensetzung  $X5CrNi18-10$  (Werkstoffnummer 1.4301), einem Außendurchmesser von  $65\text{ mm}$  und einer Wanddicke von  $2\text{ mm}$  benutzt. Es stehen insgesamt  $60\text{ m}$  aus einer Charge zur Verfügung. Sie wurden gegläht und mit geglätteter Naht ausgeliefert.

Im Allgemeinen ist der Werkstoff gut schweißbar und gut tiefziehbar, nach einer Kaltverformung jedoch ist er extrem zäh, was eine mechanische Bearbeitung nach



dem Biegen erschwert. Die klassischen Einsatzgebiete dieses Werkstoffs sind neben der Automobilindustrie vor allem die chemische, die Erdöl- und die Bauindustrie. [wikipedia2013]

In den Versuchsplänen wird anstatt dem vorher in der Arbeit verwendeten Begriff „Einflussgröße“ nun der Begriff „Zielgröße“ verwendet.

Die Namensgebung der einzelnen Versuchsteile wird einheitlich nach dem in Tabelle 3 vorgegebenen Schema gestaltet. Ein Beispiel dafür stellt die folgende Bezeichnung dar:

$$T045 - V1a - w100\_R220 - 1/2$$

*Tabelle 3: Schema zur eindeutig nachvollziehbaren Benennung der Biegeteile*

T045	V1a	w100	R220	1/2
Teilenummer (jedes Biegeteil erhält eine fortlaufende Nummer, diese ist versuchsreihenübergreifend)	Bezeichnung der Versuchsreihe	untersuchter Prozessparameter: Werkzeugabstand w = 100mm	untersuchter Prozessparameter: Biegeradius  R Soll = 220mm	das erste von zwei Biegeteilen, welche mit denselben Prozessparametern gefertigt wurden

Das Biegeteil wird jeweils mit der Teilenummer und einem Pfeil versehen, welcher bei dem Einlegen in die Traverse in Vorschubrichtung des Pushers zeigt. Durch die Hinzunahme des Versuchsprotokolls zum Biegeteil kann später eindeutig nachverfolgt werden, welche Prozessparameter untersucht wurden und welche Versuchsbedingungen zu Grunde lagen. In den Tabellen zur geplanten Versuchsdurchführung (5, 6, 7 und 9) sind die Teilenummern noch nicht in der Benennung

enthalten, da sie sich bei Änderungen der Menge an Biegeteilen, die sich während der Versuchsdurchführung voraussichtlich ergeben werden, verschieben würden.

Vor dem Biegen wurden auf einige Biegehalbzeuge Quer- und Längslinien per Lasergravur aufgebracht, um die Vermessung der Biegeteile einfacher und genauer durchführen zu können.

Die genaue Vorgehensweise, die bei der Messung der Biegeteile angewendet wurde (Messvorschrift), befindet sich im Kapitel 5.

Die Ergebnisse dieser Versuchsreihen werden nicht die für dieses Biegeverfahren und mit dieser Versuchseinrichtung absoluten Prozessgrenzen darstellen. Die Ergebnisse sind ausdrücklich nur in Verbindung mit den in Tabelle 4 und Tabelle 8 festgelegten Versuchsbedingungen zu betrachten.

### 3.2.1 Versuchsreihen V1a und V1b

Tabelle 4: Planung der Versuchsreihen V1a und V1b

Planung Versuchsreihe V1		
Zielgrößen		<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Minimaler und Maximaler Biegefaktor (Biegeradius)</li> <li>➤ Werkzeugabstand</li> </ul>
Zielstellung der Versuchsreihe		<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Ermittlung des kleinsten erzielbaren Biegeradius bis hin zum Eintritt eines Versagensfalles und des größten Biegeradius, bei dem die Wiederholgenauigkeit gegeben ist</li> <li>2) Ermittlung bzw. Eingrenzung des einzustellenden Werkzeugabstandes für vorgegebene Soll-Radien der oberen und unteren Prozessgrenze</li> </ol>
Einflussgrößen	Steuergroßen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biegeradius <math>R</math></li> <li>• Biegewinkel <math>\alpha</math></li> <li>• Vorschubgeschwindigkeit der Pusher-Achse <math>v_{fp}</math></li> <li>• Werkzeugabstand <math>w</math></li> </ul>
	Störgrößen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schwankungen der Materialeigenschaften</li> <li>• Erwärmung des Bieeteiles</li> <li>• Positioniergenauigkeit des beweglichen Werkzeuges</li> </ul>
Versuchsbedingungen		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biegehalbzeug: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Werkstoffbezeichnung: 1.4301 TC1 W1Rb</li> <li>○ Chargennummer: CH 588 539</li> <li>○ Abmessungen: D= 65mm; s= 2mm</li> </ul> </li> <li>• bei Veränderung des Werkzeugabstandes - vorheriges Abschätzen des Rückfedereffektes mithilfe Vorversuch</li> <li>• Biegeebene: z-x (laut aktuellem Koordinatensystem aus Jahr 2011)</li> <li>• Biegerichtung: Biegen nach oben</li> <li>• Lage der Schweißnaht: Innenbogen</li> <li>• „Feed Override“ ist bekannt und bleibt während dem Versuch konstant</li> <li>• Schmierstoff „WD-40“ (Firma: WD-40 Company); Rohre werden rundum benetzt</li> <li>• vor Beginn jedes Versuches: Einschaltdauer des Hydraulikaggregates = 30 min; zusätzlich 5 min. Ablauf des Leerfahrtprogrammes „SHOW.TOA“</li> <li>• keine Verwendung eines Biegedorns</li> <li>• Distanzstücke in Traverse</li> <li>• Ermittlung der Umgebungstemperatur vor der Versuchsreihe</li> <li>• TRACE-Daten werden beim Biegen automatisch aufgenommen</li> </ul>

	V1a	V1b
Messgrößen/ Messmittel	Biegeradius $R$ (Radienmessbrücke)	Biegeradius $R$ (mobiles Koordinatenmessgerät)
	Ovalisierung (Messschieber)	Biegewinkel $\alpha$ (mobiles Koordinatenmessgerät)
	Prozesssicherheit	Wiederholgenauigkeit
Materialbedarf	12 Rohre à 660mm(=4 Rohre à 2000mm)	13 Rohre à 2000 mm

In Tabelle 5 ist die voraussichtliche Durchführung der Versuchsreihe V1a sichtbar. Der Soll-Radius wird immer weiter hinab gesetzt, und zwar so weit bis ein Versagensfall des Profilquerschnittes eintritt. Danach wählt man den Soll-Radius wieder größer, um den minimal erzeugbaren Biegeradius festzulegen. Dieses Vorgehen erfolgt für zwei unterschiedliche Werkzeugabstände.

*Tabelle 5: voraussichtliche Durchführung der Versuchsreihe V1a*

<b><u>geplante Durchführung V1a</u></b>	
<b><u>Anmerkung:</u></b> Biegen eines Biegebogens pro Biegeteil	
$w = 100mm$	$w = 80mm$
$V1a - w100\_R220 - 1/1$	$V1a - w80\_R200 - 1/1$
$V1a - w100\_R200 - 1/1$	$V1a - w80\_R170 - 1/1$
$V1a - w100\_R170 - 1/1$	$V1a - w80\_R150 - 1/1$
$V1a - w100\_R150 - 1/1$	$V1a - w80\_R130 - 1/1$
$V1a - w100\_R160 - 1/1$	$V1a - w80\_R140 - 1/1$
$V1a - w100\_R165 - 1/1$	$V1a - w80\_R145 - 1/1$

Tabelle 6: geplante Durchführung des V1b-Vorversuches

<b><u>geplante Durchführung V1b- Vorversuch zum Abschätzen des Rückfederungseffektes</u></b>		
<u>Anmerkung:</u> Biegen eines Biegebogens ( $R_{Soll} = 1000mm$ ) mit zwei unterschiedlichen $w$		
	$w = 160mm$	$w = 250mm$
$R_{Soll} = 1000mm$	$V1b - Vor - w160\_R1000 - 1/1$	$V1b - Vor - w250\_R1000 - 1/1$

Tabelle 7: geplante Durchführung der Versuchsreihe V1b

<b><u>geplante Durchführung V1b</u></b>		
<u>Anmerkung:</u> Biegen vier identischer Biegeteile je eingestellten $w$ mit jeweils zwei Biegebögen ( $R4000mm/ R2000mm$ ) pro Biegeteil		
$w = 250mm$	$w = 100mm$	$w = 160mm$
$V1b - w250 - 1/4$	$V1b - w100 - 1/4$	$V1b - w160 - 1/4$
$V1b - w250 - 2/4$	$V1b - w100 - 2/4$	$V1b - w160 - 2/4$
$V1b - w250 - 3/4$	$V1b - w100 - 3/4$	$V1b - w160 - 3/4$
$V1b - w250 - 4/4$	$V1b - w100 - 4/4$	$V1b - w160 - 4/4$

### 3.2.2 Versuchsreihe V2

Tabelle 8: Planung der Versuchsreihe V2

Planung Versuchsreihe V2		
Zielgröße		➤ Änderung der Prozessgeschwindigkeit
Zielstellung der Versuchsreihe		1) Ermittlung des Einflusses hoher Prozessgeschwindigkeiten auf das Biegeergebnis (v.a. auf die Abweichung der Ist-Kontur von der Soll-Kontur und auf die Wiederholgenauigkeit)
Einflussgrößen	Steuergrößen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biegeradius <math>R</math></li> <li>• Biegewinkel <math>\alpha</math></li> <li>• Vorschubgeschwindigkeit der Pusher-Achse <math>v_{fp}</math></li> <li>• Werkzeugabstand <math>w</math></li> </ul>
	Störgrößen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schwankungen der Materialeigenschaften</li> <li>• Erwärmung des Biegeteiles</li> <li>• Positioniergenauigkeit des beweglichen Werkzeuges</li> </ul>
Versuchsbedingungen		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biegehalbzeug: <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Werkstoffbezeichnung: 1.4301 TC1 W1Rb</li> <li>◦ Chargennummer: CH 588 539</li> <li>◦ Abmessungen: <math>D = 65\text{mm}</math>; <math>s = 2\text{mm}</math></li> </ul> </li> <li>• bei Veränderung des Werkzeugabstandes - vorheriges Abschätzen des Rückfederungseffektes mithilfe Vorversuch</li> <li>• Biegeebene: z-x (laut aktuellem Koordinatensystem aus Jahr 2011)</li> <li>• Biegerichtung: Biegen nach oben</li> <li>• Lage der Schweißnaht: Innenbogen</li> <li>• „Feed Override“ ist bekannt und bleibt während dem Versuch konstant</li> <li>• Schmierstoff „WD-40“ (Firma: WD-40 Company); Rohre werden rundum benetzt</li> <li>• vor Beginn jedes Versuches: Einschaltdauer des Hydraulikaggregates = 30 min; zusätzlich 5 min. Ablauf des Leerfahrtprogrammes „SHOW.TOA“</li> <li>• keine Verwendung eines Biegedorns</li> <li>• Distanzstücke in Traverse</li> <li>• TRACE-Daten werden beim Biegen automatisch aufgenommen</li> </ul>
Materialbedarf		8 Rohre à 2000mm

Messgrößen/ Messmittel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biegeradius <math>R</math> (Radienmessbrücke oder mobiles Koordinatenmessgerät)</li> <li>• Ovalisierung <math>u</math> (Messschieber)</li> <li>• Biegewinkel <math>\alpha</math> (mobiles Koordinatenmessgerät)</li> <li>• Prozesssicherheit</li> <li>• Wiederholgenauigkeit</li> <li>• Umgebungstemperatur vor der Versuchsreihe (Thermometer)</li> </ul>
---------------------------	---

Tabelle 9: geplante Durchführung der Versuchsreihe V2

<b><u>geplante Durchführung V2</u></b>			
<u>Anmerkung:</u> Biegen von zwei Biegebögen pro Biegeteil mit $R_{Soll} = 300\text{mm}$ und jeweils gleichem $w$ , $\alpha$ und $v_{fP}$			
$v_{fP}=500\text{ mm/min}$	$v_{fP}=1500\text{ mm/min}$	$v_{fP}=2500\text{ mm/min}$	$v_{fP}=4000\text{ mm/min}$
$V2 - v_{fP} 500 - 1/2$	$V2 - v_{fP} 1500 - 1/2$	$V2 - v_{fP} 2500 - 1/2$	$V2 - v_{fP} 4000 - 1/2$
$V2 - v_{fP} 500 - 2/2$	$V2 - v_{fP} 1500 - 2/2$	$V2 - v_{fP} 2500 - 2/2$	$V2 - v_{fP} 4000 - 2/2$

## 4 Versuchsdurchführungen

Es wurde sich bei der Durchführung der Versuche - soweit es die Möglichkeiten zuließen – darum bemüht, die Versuchsbedingungen laut Versuchsplan einzuhalten und mögliche Abweichungen davon zu dokumentieren.

Um eine gute Übersichtlichkeit der Arbeit zu gewährleisten, befinden sich sämtliche Versuchsprotokolle in den Anlagen (siehe Anlagen – Versuchsprotokolle V1a, V1b, V2). In den folgenden zwei Unterkapiteln sind die bedeutendsten Änderungen gegenüber dem Versuchsplan der jeweiligen Versuchsreihe beschrieben. Eine detailliertere Auswertung der Versuchsreihen erfolgt im Kapitel 5.

### 4.1 Durchführung der Versuchsreihe V1a

Statt der geplanten zwölf Biegeteile waren für das Erreichen des Versuchszieles nur neun erforderlich. In Abbildung 18 ist eines davon dargestellt.



*Abbildung 18: Biegeteil T050 der Versuchsreihe V1a*

Bei der Einstellung des Werkzeugabstandes  $w = 80\text{mm}$  wurde bei der Leerfahrt deutlich, dass die Freigängigkeit des beweglichen Werkzeuges nicht gegeben ist. Der Werkzeugabstand musste um  $10\text{mm}$  erhöht werden.



## 4.2 Durchführung der Versuchsreihe V1b

Während der Versuchsreihe V1b bestand aufgrund der großen Soll-Radien und der daraus resultierenden geringen Werkzeuganstellung nicht die Gefahr des Eintritts eines Versagensfalles. Die vorherige Durchführung von Leerfahrten fiel ebenfalls weg, da keine Kollisionsgefahr zwischen beweglichen und feststehenden Werkzeug bestand.

Auch bei dieser Versuchsreihe wurden weniger Biegehalbzeuge benötigt, als eingeplant waren. In Abbildung 19 ist die sehr geringe Krümmung nach dem Biegen erkennbar.



*Abbildung 19: Biegeteil aus der Versuchsreihe V1b*

Ab dem Biegeteil T060 bis T063 sollten dieselben Biegeradien ( $R_{Soll} = 4000/R_{Soll} = 2000mm$ ) wie bei den vier vorherigen Biegeteilen gebogen werden, jedoch war durch die Verringerung des Werkzeugabstandes von  $w = 250mm$  auf  $w = 100mm$  keine sichtbare Krümmung nach dem Biegen festzustellen. Deshalb erfolgte eine Anpassung auf  $R_{Soll} = 1500mm/R_{Soll} = 1000mm$ . Die Biegeteile T060 und T061 sind somit nicht für die Auswertung verwendet worden.

Mit dem Werkzeugabstand  $w = 100mm$  wurden nur drei, nicht vier Biegeteile gefertigt (T062 bis T064).

Die Versuche mit dem Werkzeugabstand  $w = 160mm$  wurden nicht durchgeführt. Wegen der Messergebnisse der Teile T056 bis T064, die keinen deutlichen Einfluss des eingestellten Werkzeugabstandes auf der Wiederholgenauigkeit von Bogen zu Bogen hervorbrachten, machte die Durchführung dieser Versuche keinen Sinn mehr.

### 4.3 Durchführung der Versuchsreihe V2

Im Gegensatz zu den beiden vorherigen Versuchsreihen wurde bei dieser die vorgesehene Menge an Biegeteilen (acht Stück) eingehalten. Eines davon ist in Abbildung 20 sichtbar.



*Abbildung 20: Biegeteil aus der Versuchsreihe V2*

Das seitliche Wegfallen des Biegeteiles T067 während der Zwischengerade war ein unvorhergesehenes Ereignis. Es konnte jedoch nach dem Wiederaufrichten problemlos weitergebogen werden. Abhilfe für dieses Problem könnte das Anbringen einer Verdrehsicherung auf der Kontaktfläche des Pushers mit dem Biegehalbzeug sein.

Bei den restlichen Biegeteilen wurde die Länge der Zwischengerade von 100mm auf 40mm reduziert, um den Kontakt der Gleitführung des beweglichen Werkzeuges zum Biegeteil nicht kurzzeitig abreißen zu lassen, wie es vorher der Fall war. Der Druck auf die Rohroberfläche wird somit auch während der Zwischengerade noch leicht ausgeübt. Dadurch war es möglich, die übrigen Biegeteile zu fertigen.

In der Videoaufnahme zum Biegeteil *T069* sind gleichmäßig verteilte Streifen diagonal zur Profillängsachse auf der Rohroberfläche sichtbar. Diese weisen somit eine andere Temperatur als die übrige Rohroberfläche auf. Es ist unklar, wodurch dieser Effekt entsteht.

## 5 Auswertung

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Resultate der Versuchsreihen aufgeführt und interpretiert. Weitere Tabellen der Auswertung befinden sich in der Anlage – Auswertungstabellen. An dieser Stelle werden, um die Übersichtlichkeit zu gewährleisten, nur die für die Ziele der Versuchsreihen entscheidenden Werte benutzt.

Die Auswertung der Versuchsreihen erfolgte zum größten Teil mit Hilfe des mobilen Koordinatenmessgerätes („FARO-Arm“). Die Biegeteile wurden auf einen Messtisch aufgespannt (siehe Abbildung 21) und danach wurde der Biegeradius durch die Aufnahme von ca. 20 bis 50 Antastpunkten (je nachdem, wie viel Bogenlänge zum Messen zur Verfügung stand) bestimmt. Die Antastpunkte hatten einen Abstand von ca. 2 – 3cm und wurden entlang der vor dem Biegen auf das Biegehalbzeug aufgebrauchten Laserlinie aufgenommen.



*Abbildung 21: Aufspannung eines Biegeteiles auf den Messtisch*

Diese Messprozedur wurde an jedem Bogen mindestens einmal am Außenbogen und einmal am Innenbogen durchgeführt. Zur Bestimmung der Wiederholgenauigkeit der Messprozedur an sich wurde dies jedoch bis zu fünf Mal wiederholt.

Die zum mobilen Koordinatenmessgerät gehörende Messsoftware gibt den Ist-Radius des Außen- und Innenbogens an. Da jedoch der resultierende Radius der Mittellinie des Profilquerschnittes gesucht ist, wurde dafür am IWU ein mathematischer Algorithmus entwickelt, in den man die Koordinaten der Antastpunkte des Außen- und des Innenbogens und die mögliche Veränderung des Außendurch-

messers des Biegeteiles (Ovalisierung) eingibt. Ausgegeben wird der Ist-Radius des Bogens (siehe auch Anlage – Darstellung der Antastpunkte).

Die Bestimmung des Ist-Winkels wurde in dieser Arbeit aus Zeitgründen weggelassen, er kann jedoch für weiterführende Auswertungen mit wenig Aufwand aus den Messprotokollen der Messsoftware hinzugezogen werden.

Das Messen des Radius mit der Radienmessbrücke hat sich als ungeeignet erwiesen, da der Wert des Biegeradius offenbar an jeder Stelle des Bogens ein anderer ist und noch keine Möglichkeit bestand, diese Menge an Werten bei der Messung automatisch digital mitzuschreiben. Das ist jedoch notwendig, um sie für die Ermittlung des resultierenden Ist-Radius in den mathematischen Algorithmus eingeben zu können.

## 5.1 Kleinster erzielbarer Biegeradius (Versuchsreihe V1a)

Die Versuchsreihe V1a hatte das Ziel, den kleinsten erzielbaren Biegeradius unter Variation des Werkzeugabstandes zu ermitteln.

Unter diesen Versuchsbedingungen und dem Werkzeugabstand  $w = 100\text{mm}$  konnte ein minimaler Biegeradius von  $R_{\text{Ist}} = 337\text{mm}$  erzielt werden. Das entspricht einem Biegefaktor von  $B = 5,2$ .

Auffällig ist, dass mit dem größeren Werkzeugabstand ( $w = 100\text{mm}$ ) ein kleinerer Ist-Radius erzeugt werden konnte, als mit dem kleineren Werkzeugabstand ( $w = 90\text{mm}$ ). Dabei war derselbe Soll-Radius eingestellt.

Mit der Änderung des Werkzeugabstandes von  $w = 100\text{mm}$  auf  $w = 110\text{mm}$  und gleichbleibendem Soll-Radius war es nicht mehr möglich, das Biegeteil ohne Versagensfall zu fertigen. Das bedeutet, dass man für die Fertigung eines Ist-Radius von  $R = 337\text{mm}$  unter den gegebenen Versuchsbedingungen ausschließlich den Werkzeugabstand  $w = 100\text{mm}$  benutzen kann. Damit ist eine Festlegung dieses Prozessparameters gegeben.

Dass die Schweißnaht des Biegehalbzeuges bei dem Biegeteil T051 nicht wie vorgesehen am Innenbogen lag, hatte offensichtlich keinen mit der hier verwen-

ten Messmethode herausstellbaren Einfluss auf die Abweichung der Ist-Kontur von der Soll-Kontur (siehe Anlage - Auswertungstabellen).

Die Ovalisierung der Biegeteile lag unter diesen Versuchsbedingungen bei ca. neun Prozent, was bei dem kleinen Biegeradius in der Erwartung lag.

## **5.2 Größter Biegeradius bei gegebener Wiederholgenauigkeit (Versuchsreihe V1b)**

Ziel der Versuchsreihe V1b war es, den maximal erzielbaren Biegeradius zu ermitteln, bei dem eine zufriedenstellende Wiederholgenauigkeit von Bogen zu Bogen gegeben ist. Diese wird für diese Arbeit auf maximal drei Prozent festgelegt. Berechnet wird diese, indem die R Ist -Standardabweichung in *mm* durch den R Ist-Mittelwert in *mm* geteilt, und mit dem Faktor zwei multipliziert wird. Für die Breite der Normalverteilung wurde im Rahmen dieser Arbeit die doppelte Standardabweichung festgelegt, deswegen die Verwendung des Faktors zwei.

Wie erwartet stellte das genaue Messen sehr großer Biegeradien ein Problem dar. Es konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht geklärt werden, weshalb die Messunsicherheit der Messprozedur an sich bei dieser Versuchsreihe derart schwankt (siehe Abbildung 22 und Anlage – Auswertungstabellen). Ein möglicher Ansatzpunkt ist, dass die Ist-Kontur des Biegeteiles keinen Kreisbogen mit konstantem Radius darstellt, sondern dieser sich über die Bogenlänge verändert. Möglicherweise ist auch das angewendete Messverfahren für die Bestimmung solch großer Biegeradien nicht geeignet. Die Ursache könnte aber auch an der Biegemaschine oder am Biegehalbzeug liegen.

Das Diagramm in Abbildung 22 zeigt die wichtigsten Resultate aus der Versuchsreihe V1b. Es ist eine Gegenüberstellung der Messunsicherheit der Messprozedur an sich und der Wiederholgenauigkeit von Bogen zu Bogen.

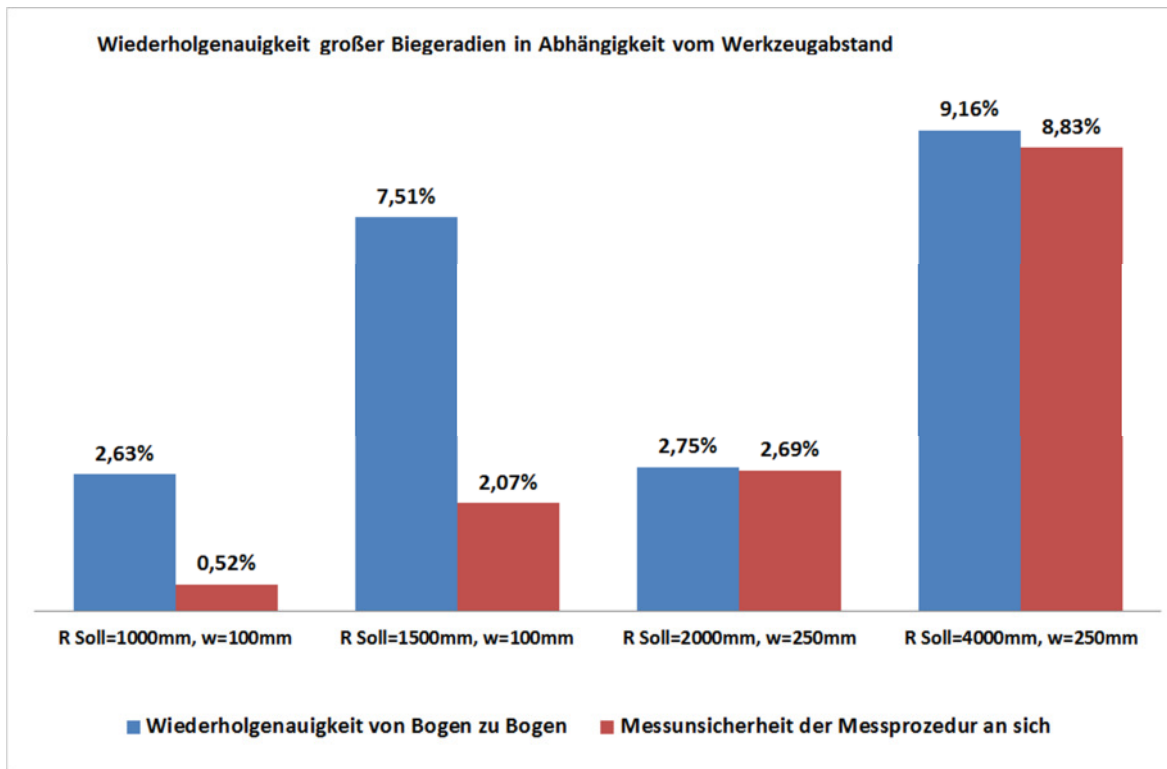


Abbildung 22: Resultate der Versuchsreihe V1b

Bei einem eingestellten Werkzeugabstand von  $w = 250\text{mm}$  zeigt sich, dass die Messunsicherheit der Messprozedur an sich etwa gleich groß der Wiederholgenauigkeit von Bogen zu Bogen ist. Bei dem Werkzeugabstand  $w = 100\text{mm}$  gibt es einen deutlichen Unterschied zwischen diesen zwei Größen. Die Ursache hierfür ist unklar (siehe auch Anlage – Auswertungstabellen).

Die für diese Arbeit festgelegte Obergrenze für die Wiederholgenauigkeit von Bogen zu Bogen von 3 % wurde von den zwei Prozessparameter-Paaren mit  $R\text{ Soll} = 1000\text{mm}, w = 100\text{mm}$  und  $R\text{ Soll} = 2000\text{mm}, w = 250\text{mm}$  unterschritten. Der größte erzielte Ist-Radius bei gegebener Wiederholgenauigkeit beträgt  $R\text{ Ist} = 4129\text{mm}$  (R Ist- Mittelwert aus drei Radien gebildet). Das entspricht einem maximalen Biegefaktor von  $B = 63,5$ .

Die Prozessparameterpaare  $R\text{ Soll} = 1500\text{mm}, w = 100\text{mm}$  und  $R\text{ Soll} = 4000\text{mm}, w = 250\text{mm}$  werden als Konsequenz aus der festgelegten Obergrenze als solche angesehen, die unter diesen Versuchsbedingungen nicht wiederholgenau gefertigt werden können.



Eine Abhängigkeit der Wiederholgenauigkeit vom jeweils eingestellten Werkzeugabstand ist nicht erkennbar.

Bemerkenswert ist außerdem, dass das Biegen mit den eingestellten Prozessparametern  $R_{Soll} = 2000\text{mm}/4000\text{mm}$ ,  $w = 250\text{mm}$  im Durchschnitt einen kleineren Biegeradius ( $R_{Ist} = 3543\text{mm}/11736\text{mm}$ ) zur Folge hatte, als das Biegen mit den Prozessparametern  $R_{Soll} = 1000\text{mm}/1500\text{mm}$ ;  $w = 100\text{mm}$ , ( $R_{Ist} = 4129\text{mm}/14026\text{mm}$ ) (siehe Abbildung 23).

Gesamtauswertung der Versuchsreihe V1b: Wiederholgenauigkeit großer Biegeradien			
	R Ist- Mittelwert [mm]	Wiederholgenauigkeit von Bogen zu Bogen [%]	Messunsicherheit der Messprozedur an sich [%]
R Soll=1000mm, w=100mm	4129	2,63%	0,52%
R Soll=1500mm, w=100mm	14026	7,51%	2,07%
R Soll=2000mm, w=250mm	3543	2,75%	2,69%
R Soll=4000mm, w=250mm	11736	9,16%	8,83%

Abbildung 23: Gesamtauswertung der Versuchsreihe V1b

Damit bestätigt sich die Erkenntnis aus der Versuchsreihe V1a: der Werkzeugabstand hat einen signifikanten Einfluss auf den Ist-Radius. Eine Vermutung für die Begründung dieses Ergebnisses ist, dass mit einem größeren Werkzeugabstand weniger elastische Rückfederung im Biegeteil erzeugt wird, als mit einem kleineren Werkzeugabstand. Es kann aber auch an anderen Einflussgrößen liegen - im Rahmen dieser Arbeit kann dies nicht näher untersucht werden.

Alle Biegeteile der Versuchsreihe V1b weisen keine nennenswerte Ovalisierung des Profilquerschnittes auf.

### 5.3 Erhöhung der Prozessgeschwindigkeit (Versuchsreihe V2)

In der Versuchsreihe V2 ging es darum, den Einfluss einer erhöhten Prozessgeschwindigkeit auf das Biegeergebnis herauszustellen. Im Vordergrund der Analyse

stand dabei der Einfluss auf die Abweichung der Ist-Kontur von der Soll-Kontur, die eventuelle Beeinflussung der Wiederholgenauigkeit sollten ebenfalls untersucht werden.

In Abbildung 24 sind die Auswirkungen der Erhöhung der Prozessgeschwindigkeit auf den Ist-Radius dargestellt. Es ist unklar, weshalb der Biegeradius des Teiles T065 signifikant von den erzielten Biegeradien der anderen Biegeteile abweicht. Bei den Prozessgeschwindigkeiten  $vfp = 1500 \text{ mm/min}$  und  $vfp = 2500 \text{ mm/min}$  sind jeweils nur drei Punkte im Diagramm sichtbar. Das liegt an den Bögen mit  $R_{Ist} = 602 \text{ mm}$  und  $R_{Ist} = 604 \text{ mm}$  die jeweils zwei Mal errechnet wurden (siehe auch Abbildung 25).

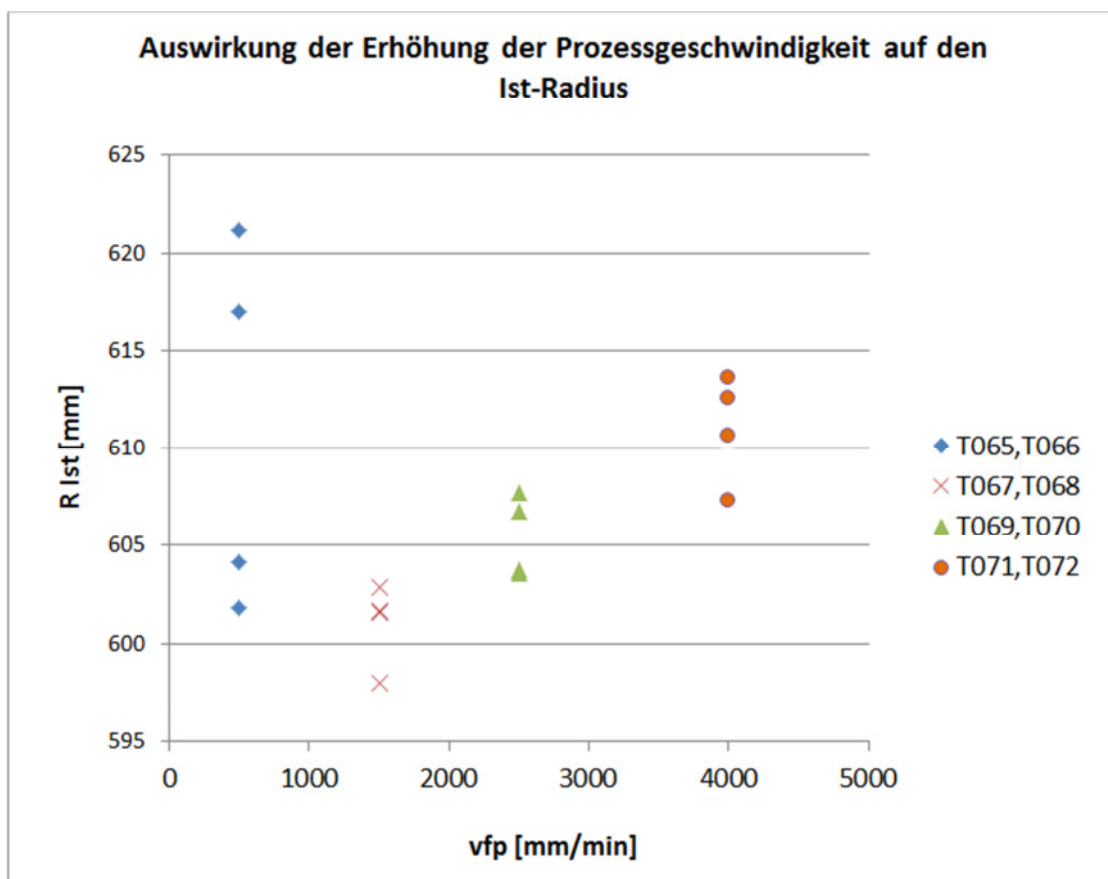


Abbildung 24: Auswirkung der Erhöhung der Prozessgeschwindigkeit auf den Ist-Radius

Prinzipiell zeigt sich im Diagramm, dass ab der Prozessgeschwindigkeit  $vfp = 1500 \text{ mm/min}$  der Ist- Radius leicht zunimmt.

Das bedeutet, dass eine Erhöhung der Prozessgeschwindigkeit eine größere Abweichung des Ist-Radius vom Soll-Radius bewirkt, es kommt jedoch nicht wie erwartet zu großen Abweichungen.

Die Wiederholgenauigkeit von Bogen zu Bogen unter gleichen Prozessparametern ist trotz starker Erhöhung der Prozessgeschwindigkeit nahezu gleichbleibend gut (siehe in Abbildung 25 unter: "Wiederholgenauigkeit [%]").

Die Messunsicherheit der Messprozedur an sich liegt im Mittel bei nur 0,02%. Sie ist damit um den Faktor 35 kleiner, als die Wiederholgenauigkeit von Bogen zu Bogen, die im besten Fall bei maximal 0,70% liegt (siehe Abbildung 25).

In Folge dessen kann die ermittelte Wiederholgenauigkeit von Bogen zu Bogen für die gewählten Prozessparameter und unter den festgelegten Versuchsbedingungen als real angesehen werden. Die angewendete Messmethode ist eindeutig geeignet.

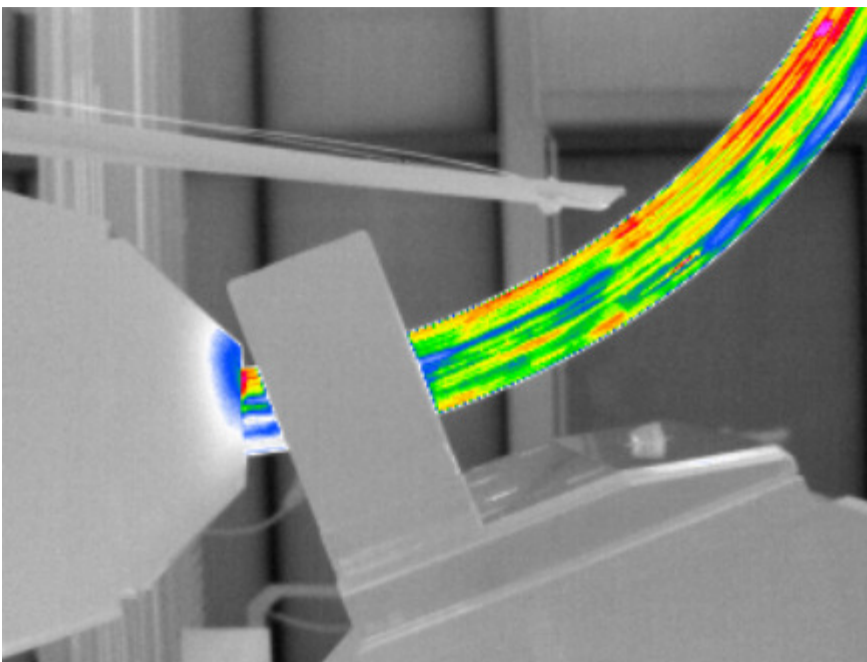
	T065	T066	T067	T068	T069	T070	T071	T072
	vfp=500 mm/min		vfp=1500 mm/min		vfp=2500 mm/min		vfp=4000 mm/min	
Bogen1 R Ist [mm]	617	602	603	598	604	604	607	613
Bogen2 R Ist [mm]	621	604	602	602	607	608	611	614
R Ist -Mittelwert [mm]	611		601		605		611	
R Ist -Standardabweichung [mm]	9,50		2,11		2,11		2,73	
Wiederholgenauigkeit [%]	3,11%		0,70%		0,70%		0,89%	

Abbildung 25: Zusammenstellung der Messergebnisse der Versuchsreihe V2

Die Ovalisierung des Profilquerschnittes liegt bei allen Biegeteilen der Versuchsreihe V2 bei fünf bis sechs Prozent.

Die bei dieser Versuchsreihe V2 aufgenommenen Videos mit Hilfe einer Thermokamera brachten hervor, dass die maximale Temperatur eines Biegeteiles während dem Umformprozess trotz der größten eingestellten Prozessgeschwindigkeit von  $vfp = 4000 \text{ mm/min}$  bei ca.  $45^\circ\text{C}$  lag. Von daher haben thermische Einflüsse

erwartungsgemäß keine oder nur geringe Signifikanz auf das Biegeergebnis der in allen Versuchsreihen durchgeführten Biegeversuche. In Abbildung 26 ist ein Bildschirmfoto der Videoaufnahme von dem Biegevorgang des Biegeteiles T071 sichtbar.



*Abbildung 26: Biegevorgang von T071 - Ausschnitt aus dem Video, welches mit einer Thermokamera aufgenommen wurde*

## 6 Zusammenfassung

### 6.1 Ergebnisse

Nachfolgend sind die wichtigsten Erkenntnisse aus den Versuchsreihen zusammengefasst, in denen die folgenden drei Einflussgrößen experimentell untersucht wurden:

- Änderung der Prozessgeschwindigkeit
- Variation des Werkzeugabstandes
- Minimaler/ Maximaler Biegefaktor.

Die Annahme, dass eine starke Erhöhung der **Prozessgeschwindigkeit** das Biegeergebnis signifikant beeinflusst, bestätigte sich nicht. Unter den festgelegten Versuchsbedingungen führte die Vervielfachung der Prozessgeschwindigkeit nur zu einem leichten Anstieg des Ist-Radius, die Wiederholgenauigkeit von Bogen zu Bogen blieb nahezu konstant. Ein sicheres Prozessfenster für diese Einflussgröße kann anhand der durchgeführten Versuchsreihe nach oben abgegrenzt werden, und zwar bis zum Wert  $v_{fp} = 4000 \text{ mm/min}$ . Die endgültige Obergrenze kann für dieses Biegeverfahren und mit dem gegebenen Biegehalbzeug im Rahmen dieser Arbeit nicht ermittelt werden.

Der vermutete Einfluss der Größe des **Werkzeugabstandes** auf die Ovalisierung des Profilquerschnittes konnte nicht bestätigt werden. Das liegt wahrscheinlich an den großen gewählten Soll-Radius in der Versuchsreihe V1b. In der Versuchsreihen V1a und V2 fand keine starke bzw. keine Variation des Werkzeugabstandes statt, an der dieser Einfluss hätte bewiesen werden können. Die Annahme, dass mit der Vergrößerung des Werkzeugabstandes der minimal erzeugbare Biegeradius steigt, bestätigte sich ebenfalls nicht - mit größerem Soll-Radius und dazu größerem Werkzeugabstand konnte trotzdem ein kleinerer Ist-Radius erzeugt werden im Vergleich zum kleineren Soll-Radius und Werkzeugabstand (siehe Kapitel 5.2).

Der in früheren Versuchen ermittelte minimale Biegefaktor  $B = 5,5$  konnte in der Versuchsreihe V1a unterboten werden – der kleinste erreichte Biegeradius von  $R_{Ist} = 337mm$  ergibt den **minimalen Biegefaktor**  $B = 5,2$ . Versuche, bei denen noch kleinere Ist-Radien angestrebt wurden, führten zu Versagensfällen. Damit ist die untere Grenze des Prozessfensters festgelegt, die unter diesen Versuchsbedingungen und mit diesem Biegehalbzeug erreicht werden kann. Der optimale Prozessparameter für den Werkzeugabstand liegt in diesem Fall bei  $w = 100mm$ , da eine Variation dieses Wertes nicht zur Verringerung, sondern zur Erhöhung des Ist-Radius bzw. zum Versagensfall führte.

Der größte Biegeradius, bei dem die Wiederholgenauigkeit von Bogen zu Bogen drei Prozent nicht überschritt, betrug  $R_{Ist} = 4129mm$ . Das entspricht einem **maximalen Biegefaktor** von  $B = 63,5$ .

## 6.2 Fazit

Das Ziel dieser Arbeit bestand darin eine möglichst effektive und wiederverwendbare Vorgehensweise zu erarbeiten, mit welcher die tatsächliche Signifikanz möglicher Einflussgrößen und optimale Prozessparameter für eine konkrete Biegeaufgabe einfach und sicher bestimmbar werden. Dafür wurden zunächst zu jeder potentiellen Einflussgröße und für jedes Qualitätskriterium die bereits bestehenden Erkenntnisse bzw. Erfahrungen analysiert, was eine intensive Literaturrecherche voraussetzte. Danach erfolgte die Erarbeitung der Vorgehensweise, die in der Aufstellung der Versuchspläne mündete.

Durch die Ausgrenzung von Einflussgrößen, deren Signifikanz für das Biegeergebnis als minimal betrachtet werden kann, bzw. welche im begrenzten Rahmen dieser Arbeit nicht in die Untersuchungen einbezogen werden konnten, war eine Fokussierung auf nur drei Einflussgrößen möglich. Diese wurden mit Hilfe der vorher aufgestellten Versuchspläne experimentell untersucht. Bei den Messungen und der Auswertung der Messergebnisse tauchten immer wieder neue Fragestellungen und Probleme auf. Diese Tatsache verhinderte es im begrenzten Rahmen dieser Arbeit weitergehende Aussagen über die Einflussgrößen treffen zu können,

als die in den Kapiteln 5 und 6.1 dargelegten. Trotzdem hat sich an den Ergebnissen dieser Arbeit gezeigt, dass die erarbeitete Vorgehensweise durchaus effektiv ist, da mit einer relativ geringen Anzahl an Versuchen einige wichtige Erkenntnisse erzielt werden konnten.

Damit eine gute Wiederverwendbarkeit der erarbeiteten Vorgehensweise zukünftig gegeben ist, sollten alle erstellten Formulare, wie zum Beispiel die Versuchsprotokolle und die Auswertungstabellen derart aufbereitet werden, dass sie problemlos auch von anderen Personen weiterhin als Vorlage verwendet werden können. Das Schema zur Nummerierung der Biegeteile sollte man ebenfalls fortführen.

Mit der erarbeiteten Vorgehensweise konnte sicher eine gute Grundlage für die Durchführung zukünftiger Versuchsreihen gelegt werden, mit denen der Einfluss jener möglicher Einflussgrößen noch herausgestellt werden kann, welche in dieser Arbeit nicht untersucht werden konnten, oder welche nicht im Betrachtungsraum standen.





## Glossar

<b>3D-Freiformbiegen</b>	„Biegen von Rohren und Profilen entlang einer frei definierbaren Raumkurve. Erzeugen von Radienverläufen und räumlichen (nichtebenen) Krümmungen“ [IWU2013], Glossar
<b>Biegefaktor</b>	„Beim Rohrbiegen Quotient $R/D$ aus Biegeradius und Rohrdurchmesser“ [IWU2013], Glossar
<b>Biegehalbzeug</b>	entspricht dem zu biegenden Werkstück, bevor der Biegevorgang gestartet wurde
<b>Biegeteil</b>	entspricht dem Werkstück, nachdem der Biegevorgang beendet wurde
<b>Einflussgröße</b>	„Einflussgrößen sind Größen, die die Versuchsergebnisse (Zielgrößen) möglicherweise beeinflussen.“ [Kleppmann2008]-(Kapitel 2)
<b>Freiheitsgrad</b>	„Anzahl voneinander unabhängiger Bewegungsmöglichkeiten eines mechanischen Systems. Der höchste Freiheitsgrad im Raum ist sechs (drei translatorische und drei rotatorische Freiheiten).“ [IWU2013], Glossar
<b>Gleitführung des beweglichen Werkzeuges/ des feststehenden Werkzeuges</b>	Alle Teile des beweglichen/ des feststehenden Werkzeuges, die direkt der Umformung dienen. Sie werden zweckmäßig aus einem Werkstoff mit guten Gleiteigenschaften sowie besonders hohen Festigkeitswerten gefertigt.

<b>HexaBend</b>	„Parallelkinematische Freiformbiegemaschine am Fraunhofer IWU Chemnitz. Wurde als Prototyp und Versuchseinrichtung vom Fraunhofer IWU gemeinsam mit der PEM Automationstechnik Schwarzenberg entwickelt.“ [IWU2013], Glossar
<b>Hexapod</b>	„Sechsfüßer‘, Bezeichnung für eine Parallelkinematik, die über sechs längenveränderliche Antriebsstreben und sechs Bewegungsfreiheitsgrade verfügt. Bei der HexaBend bezeichnet H. den Bewegungsapparat, mit welchem das bewegliche Biegewerkzeug im Raum positioniert wird.“ [IWU2013], Glossar
<b>Kinematisches Biegen</b>	„Biegeprinzip, bei dem sich die Endkontur ausschließlich durch koordinierte räumliche Bewegung des Biegeapparates und nicht durch formspeichernde Werkzeuge (Matrizen) herausbildet. Nach DIN 8586 auch „Freies Biegen“ genannt. K. ist das Grundprinzip für das 3D-Freiformbiegen auf der HexaBend.“ [IWU2013], Glossar
<b>Parallelkinematik</b>	„Konstruktionsprinzip eines mehrachsigen Bewegungssystems, bei dem alle am Maschinengestell befestigten Antriebe unmittelbar auf den zu bewegendenden Effektor (z.B. einen Werkzeugträger für ein Bearbeitungswerkzeug) wirken. P.en sind eine Variante geschlossener kinematischer Ketten. Im Gegensatz dazu sind klassische Werkzeugmaschinen und Industrieroboter als „serielle Kinematiken“ nach dem Prinzip der offenen kinematischen Kette konstruiert.“ [IWU2013], Glossar
<b>Pusher</b>	„Vergleichbar mit dem „Booster“ an herkömmlichen Rotationszugbiegemaschinen ist der P. der HexaBend ein

	kräftiger, geregelter elektromechanischer Vorschubantrieb, der das Halbzeug nach dem Einlegen in die Maschine am hinteren Ende formschlüssig fasst und nach vorn in die Biegezone schiebt.“ [IWU2013], Glossar
<b>Steuergröße</b>	„Steuergrößen sind Einflussgrößen, deren Wert für das Produkt bzw. den Fertigungsprozess auf einen bestimmten Wert eingestellt und dort (in gewissen Grenzen) gehalten werden kann (...).“ [Kleppmann2008] (Kapitel 2)
<b>Störgröße</b>	„Störgrößen sind Einflussgrößen, deren Wert für das Produkt bzw. den Fertigungsprozess nicht vorgegeben werden kann (oder z.B. aus Kostengründen nicht vorgegeben werden soll (...)).“ [Kleppmann2008] (Kapitel 2)
<b>Tool Center Point, TCP</b>	„Ein gedachter Referenzpunkt, der sich an geeigneter Stelle am Endeffektor eines Industrieroboters oder einer Werkzeugmaschine befindet. Die anzufahrende Position wird i.d.R. über den TCP beschrieben. Der TCP definiert normalerweise den Ursprung des Werkzeugkoordinatensystem (Tool Coordinate System, TCS).“ [IWU2013], Glossar
<b>Versagen des Profilquerschnittes</b>	„Als Versagen wird der Fall bezeichnet, wenn das Bauteil als solches nicht mehr genutzt werden kann und gleichzeitig der Biegeprozess versagt und beispielsweise nicht mehr zu Ende geführt werden kann.“ [Hoffmann u.a.2012]-(Kapitel 6.4.3)
<b>Zielgröße</b>	„Zielgrößen beschreiben das Ergebnis eines Versuchs. Zielgrößen können Messwerte sein, aber auch Größen, die aus einen oder mehreren Messwerten errechnet werden. Bei einem Versuch könne mehrere Zielgrößen bestimmt werden.“ [Kleppmann2008]-(Kapitel 2)



## Quellenverzeichnis

- [Gerlach2010] Gerlach, Christian: Ein Beitrag zur Herstellung definierter Freiformbiegegeometrien bei Rohren und Profilen. Dissertation, Universität Siegen, Shaker Verlag, 2010.
- [Groth2013] Groth, Sebastian (Lehrstuhl für Umformtechnik Universität Siegen) - E-Mail vom 16.05.2013
- [Hermes2012] Hermes, Matthias: Neue Verfahren zum rollenbasierten 3D-Biegen von Profilen. Dissertation, TU Dortmund, Shaker Verlag, 2012.
- [Hoffmann u.a.2012] Hoffmann, H., u.a.: Handbuch Umformen, Carl Hanser Verlag, München, 2012.
- [IWU2011?] Freiform-Druckbiegen mit bewegten Matrizen, internes Dokument, Fraunhofer IWU, Chemnitz, 2011?
- [IWU2012] Otto-Adamczak, T.; Hoffmann, M.; Priber, U.: Freiformbiegen mit parallelkinematischer Werkzeugführung. Interner Forschungsbericht, Fraunhofer IWU, Chemnitz, 2012.
- [IWU2013] Hoffmann, M., u.a.: HexaBend – Freiformbiegen auf einer parallelkinematischen Biegemaschine, Gemeinsamer Ergebnisbericht, Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (Hrsg.), Chemnitz, 2013.

- [Kersten/Engel2010] Kersten, Sebastian; Engel, Bernd: Sensitivitätsanalyse beim Freiformbiegen von Rohrprofilen. Europäische Forschungsgesellschaft für Blechbearbeitung (Hrsg.): Tagungsband 31 des 30. EFB-Kolloquiums Blechverarbeitung, Bad Boll, 2010.
- [Kersten2012] Kersten, Sebastian: "Prozessmodelle zum Drei-Rollen-Schubbiegen von Rohrprofilen", Siegen, 2012. An der Universität Siegen eingereichte Dissertation.
- [Kibben2005] Kibben, Martin: Freiformbiegen- erweiterte Chancen für profilintensive Bauweisen in der Fahrzeugtechnik, werkstoff.forum 2005, München
- [Kleppmann2008] Kleppmann, Wilhelm: Taschenbuch Versuchsplanung, Carl Hanser Verlag, München, 2008.
- [Kopfer2009] Kopfer, Peter: Analytische Betrachtung der Biegeparameter beim Freiformbiegen. Bachelorarbeit, Universität Siegen, 2009.
- [Kumm2013] Kummermehr, Lothar (J. Neu GmbH) - E-Mail vom 23.01.2013
- [Lorenz2004] Lorenz, U.: Wissenschaftliche Grundlagen zur Verkürzung von Prozessketten für Space-Frame-Komponenten. Forschungsbericht, Fraunhofer IWU, Chemnitz, 2004.

- [Neugebauer2001] Neugebauer, Reimund u.a.: 3D-Freiformbiegen von Profilen, München, Carl Hanser Verlag, 2001
- [Schlaepfer2013] <http://schlaepfer-metall.ch/index.php/produkte/3d-biegetechnik/>, verfügbar am 15.05.2013, 14:26 Uhr
- [Schuster2011] Schuster & Co. GmbH: Werksnorm für kaltgefertigte Rohrbogen und Rohrbiegungen, Stand 1/11, Mannheim.
- [smerobot2008] <http://smerobot-tools.prospektiv.de/glossar/deu/positioniergenauigkeit.html>, verfügbar am 08.05.2013, 14:44 Uhr
- und
- <http://smerobot-tools.prospektiv.de/glossar/deu/bahngenauigkeit.html>, verfügbar am 08.05.2013, 14:46 Uhr
- [VDI-Entwurf2011] Verein Deutscher Ingenieure: Entwurf der VDI-Richtlinie 3430, 2011.
- [wikipedia2013] [http://de.wikipedia.org/wiki/Nichtrostender\\_Stahl#Werkstoffnummer\\_1.4301\\_-\\_X5CrNi18-10](http://de.wikipedia.org/wiki/Nichtrostender_Stahl#Werkstoffnummer_1.4301_-_X5CrNi18-10), verfügbar am 13.05.2013, 15:26 Uhr





## Anlagen

Anlagen - Versuchsprotokolle V1a.....	A-I
Anlagen - Versuchsprotokolle V1b.....	A-V
Anlagen - Versuchsprotokolle V2.....	A-IX
Anlagen - Auswertungstabellen.....	A-XIII
Anlagen – NC-Programm.....	A-XVI
Anlagen – Darstellung der Antastpunkte.....	A-XIX
Anlagen - Zugproben.....	A-XX



# Anlage - Versuchsprotokolle V1a

Die folgenden Tabellen stellen die Versuchsprotokolle aller in der Versuchsreihe V1a durchgeführten Versuche dar.

Versuchsprotokoll der Versuchsreihe V1a			T045 – V1a – w100_R200 – 1/1
<b>Datum:</b> 21.3.2013	<b>Uhrzeit:</b> 10:20	<b>Bediener:</b> Tobias Otto-Adamczak, Stefan Orosz	
<b>ProTUBA-Dateiname/ Ablagepfad:</b>  I:\OE110\2_Projekte\125237 HEXABEND - Priber\10 Hexabend PLUS\Versuche_Orosz\Orosz_V1A_min_Biegefaktor			
<b>Ausgangslänge Biegehalbzeug:</b> 660mm	<b>Länge Nachschieberohr:</b> 660mm	<b>Lufttemperatur:</b> 21,8 °C	
<b>Versuchsziel:</b> Ermittlung des kleinsten erzielbaren Biegeradius bis hin zum Eintritt eines Versagensfalles			
<b>maßgebende Prozessparameter:</b> $R_{Soll} = 200mm$ ; $w = 100mm$			
<b>Anmerkungen:</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• „Länge real“ in ProTUBA = 665 mm</li><li>• „Feed- Override“: 50%</li><li>• Versuch erfolgreich</li></ul>		

Versuchsprotokoll der Versuchsreihe V1a		T046 – V1a – w100_R170 – 1/1
<u>Datum:</u> 21.3.2013	<u>Uhrzeit:</u> 11:30	<u>Bediener:</u> Tobias Otto-Adamczak, Stefan Orosz
<u>ProTUBA-Dateiname/ Ablagepfad:</u> I:\OE110\2_Projekte\125237 HEXABEND - Priber\10 Hexabend PLUS\Versuche_Orosz\Orosz_V1A_min_Biegefaktor		
<u>Ausgangslänge Biegehalbzeug:</u> 660mm	<u>Länge Nachschieberohr:</u> 660mm	<u>Lufttemperatur:</u> 21,8 °C
<u>Versuchsziel:</u> Ermittlung des kleinsten erzielbaren Biegeradius bis hin zum Eintritt eines Versagensfalles		
<u>maßgebende Prozessparameter:</u> $R_{soll} = 170mm$ ; $w = 100mm$		
<u>Anmerkungen:</u>	<ul style="list-style-type: none"><li>• „Feed- Override“: 50%</li><li>• Versuch erfolgreich</li><li>• etwas Geräuschbildung</li></ul>	

Versuchsprotokoll der Versuchsreihe V1a		T047 – V1a – w100_R150 – 1/1
<b>Datum:</b> 21.3.2013	<b>Uhrzeit:</b> 14:20	<b>Bediener:</b> Tobias Otto-Adamczak, Stefan Orosz
<b>ProTUBA-Dateiname/ Ablagepfad:</b> I:\OE110\2_Projekte\125237 HEXABEND - Priber\10 Hexabend PLUS\Versuche_Orosz\Orosz_V1A_min_Biegefaktor		
<b>Ausgangslänge Biegehalbzeug:</b> 660mm	<b>Länge Nachschieberohr:</b> 660mm	<b>Lufttemperatur:</b> 21,6 °C
<b>Versuchsziel:</b> Ermittlung des kleinsten erzielbaren Biegeradius bis hin zum Eintritt eines Versagensfalles		
<b>maßgebende Prozessparameter:</b> $R_{Soll} = 150mm$ ; $w = 100mm$		
<b>Anmerkungen:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>„Feed- Override“: 30%</li> <li>Versagensfall – Einfall des Profilquerschnittes</li> </ul>	

Versuchsprotokoll der Versuchsreihe V1a		T048 – V1a – w100_R160 – 1/1
<b>Datum:</b> 21.3.2013	<b>Uhrzeit:</b> 15:15	<b>Bediener:</b> Tobias Otto-Adamczak, Stefan Orosz
<b>ProTUBA-Dateiname/ Ablagepfad:</b> I:\OE110\2_Projekte\125237 HEXABEND - Priber\10 Hexabend PLUS\Versuche_Orosz\Orosz_V1A_min_Biegefaktor		
<b>Ausgangslänge Biegehalbzeug:</b> 660mm	<b>Länge Nachschieberohr:</b> 660mm	<b>Lufttemperatur:</b> 21,7 °C
<b>Versuchsziel:</b> Ermittlung des kleinsten erzielbaren Biegeradius bis hin zum Eintritt eines Versagensfalles		
<b>maßgebende Prozessparameter:</b> $R_{Soll} = 160mm$ ; $w = 100mm$		
<b>Anmerkungen:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>„Feed- Override“: 50%</li> <li>Versuch erfolgreich</li> </ul>	

Versuchsprotokoll der Versuchsreihe V1a		T049 – V1a – w90_R160 – 1/3
<b>Datum:</b> 22.3.2013	<b>Uhrzeit:</b> 10:35	<b>Bediener:</b> Tobias Otto-Adamczak, Stefan Orosz
<b>ProTUBA-Dateiname/ Ablagepfad:</b> I:\OE110\2_Projekte\125237 HEXABEND - Priber\10 Hexabend PLUS\Versuche_Orosz\Orosz_V1A_min_Biegefaktor		
<b>Ausgangslänge Biegehalbzeug:</b> 660mm	<b>Länge Nachschieberohr:</b> 660mm	<b>Lufttemperatur:</b> 21,4 °C
<b>Versuchsziel:</b> Ermittlung des kleinsten erzielbaren Biegeradius bis hin zum Eintritt eines Versagensfalles		
<b>maßgebende Prozessparameter:</b> $R_{Soll} = 160mm$ ; $w = 90mm$		
<b>Anmerkungen:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>„Feed- Override“: 50%</li> <li>Versuch erfolgreich</li> <li>Faltenbildung am Innenbogen</li> </ul>	

Versuchsprotokoll der Versuchsreihe V1a		T050 – V1a – w90_R160 – 2/3
<b>Datum:</b> 22.3.2013	<b>Uhrzeit:</b> 11:15	<b>Bediener:</b> Tobias Otto-Adamczak, Stefan Orosz
<b>ProTUBA-Dateiname/ Ablagepfad:</b> I:\OE110\2_Projekte\125237 HEXABEND - Priber\10 Hexabend PLUS\Versuche_Orosz\Orosz_V1A_min_Biegefaktor		
<b>Ausgangslänge Biegehalbzeug:</b> 660mm	<b>Länge Nachschieberohr:</b> 660mm	<b>Lufttemperatur:</b> 21,7 °C
<b>Versuchsziel:</b> Nachweis der Reproduzierbarkeit des Ergebnisses von T049 – V1a – w90_R160 – 1/3		
<b>maßgebende Prozessparameter:</b> $R_{Soll} = 160\text{mm}$ ; $w = 90\text{mm}$		
<b>Anmerkungen:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• „Feed- Override“: 50%</li> <li>• Versuch erfolgreich</li> <li>• bewegl. Werkzeug hatte minimal Kontakt zum feststehenden Werkzeug</li> <li>• Geräuschentwicklung</li> </ul>	

Versuchsprotokoll der Versuchsreihe V1a		T051 – V1a – w90_R160 – 3/3
<b>Datum:</b> 22.3.2013	<b>Uhrzeit:</b> 12:20	<b>Bediener:</b> Tobias Otto-Adamczak, Stefan Orosz
<b>ProTUBA-Dateiname/ Ablagepfad:</b> I:\OE110\2_Projekte\125237 HEXABEND - Priber\10 Hexabend PLUS\Versuche_Orosz\Orosz_V1A_min_Biegefaktor		
<b>Ausgangslänge Biegehalbzeug:</b> 660mm	<b>Länge Nachschieberohr:</b> 660mm	<b>Lufttemperatur:</b> 21,7 °C
<b>Versuchsziel:</b> Nachweis der Reproduzierbarkeit des Ergebnisses von T049 – V1a – w90_R160 – 1/3		
<b>maßgebende Prozessparameter:</b> $R_{Soll} = 160\text{mm}$ ; $w = 90\text{mm}$		
<b>Anmerkungen:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• „Feed- Override“: 50%</li> <li>• Biegehalbzeug nicht korrekt eingelegt- Schweißnaht liegt nicht am Innenbogen</li> <li>• Versuch erfolgreich</li> <li>• bewegl. Werkzeug hatte minimal Kontakt zum feststehenden Werkzeug</li> <li>• Geräuschentwicklung</li> </ul>	

Versuchsprotokoll der Versuchsreihe V1a		T052 – V1a – w110_R160 – 1/2
<b>Datum:</b> 22.3.2013	<b>Uhrzeit:</b> 14:30	<b>Bediener:</b> Tobias Otto-Adamczak, Stefan Orosz
<b>ProTUBA-Dateiname/ Ablagepfad:</b> I:\OE110\2_Projekte\125237 HEXABEND - Priber\10 Hexabend PLUS\Versuche_Orosz\Orosz_V1A_min_Biegefaktor		
<b>Ausgangslänge Biegehalbzeug:</b> 660mm	<b>Länge Nachschieberohr:</b> 660mm	<b>Lufttemperatur:</b> 21,3 °C
<b>Versuchsziel:</b> Eingrenzung des einzustellenden Werkzeugabstandes für den vorgegebenen Soll-Radius		
<b>maßgebende Prozessparameter:</b> $R_{Soll} = 160\text{mm}$ ; $w = 110\text{mm}$		
<b>Anmerkungen:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• „Feed- Override“: 50%</li> <li>• Versagensfall: Einfall des Profilquerschnittes</li> <li>• bei Herausdrücken des kaputten Rohres bewegte sich die Plattform entlang der Erhöhung auf dem Rohr kurz nach oben, ohne sie angesteuert zu haben (weshalb ist unklar)</li> </ul>	

Versuchsprotokoll der Versuchsreihe V1a		T053 – V1a – w110_R160 – 2/2
<b><u>Datum:</u></b> 22.3.2013	<b><u>Uhrzeit:</u></b> 15:00	<b><u>Bediener:</u></b> Tobias Otto-Adamczak, Stefan Orosz
<b><u>ProTUBA-Dateiname/ Ablagepfad:</u></b> I:\OE110\2_Projekte\125237 HEXABEND - Priber\10 Hexabend PLUS\Versuche_Orosz\Orosz_V1A_min_Biegefaktor		
<b><u>Ausgangslänge Biegehalbzeug:</u></b> 660mm	<b><u>Länge Nachschieberohr:</u></b> 660mm	<b><u>Lufttemperatur:</u></b> 21,3 °C
<b><u>Versuchsziel:</u></b> Nachweis der offenbar nicht gegebenen Prozesssicherheit		
<b><u>maßgebende Prozessparameter:</u></b> $R_{Soll} = 160mm$ ; $w = 110mm$		
<b><u>Anmerkungen:</u></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• „Feed- Override“: 50%</li> <li>• Versagensfall: Einfall des Profilquerschnittes</li> </ul>	

# Anlage - Versuchsprotokolle V1b

Die folgenden Tabellen stellen die Versuchsprotokolle aller in der Versuchsreihe V1b durchgeführten Versuche dar.

Versuchsprotokoll der Versuchsreihe V1b		T054 – V1b – Vor – w160_R1000 – 1/1
<b>Datum:</b> 09.04.2013	<b>Uhrzeit:</b> 16:35	<b>Bediener:</b> Tobias Otto-Adamczak, Stefan Orosz
<b>ProTUBA-Dateiname/ Ablagepfad:</b> I:\OE110\2_Projekte\125237 HEXABEND - Priber\10 Hexabend PLUS\Versuche_Orosz\Orosz_V1b__Vorversuch		
<b>Ausgangslänge Biegehalbzeug:</b> 865 mm	<b>Länge Nachschieberohr:</b> 1135 mm	<b>Lufttemperatur:</b> 23,9°C
<b>Versuchsziel:</b> Abschätzung des Rückfederungseffektes		
<b>maßgebende Prozessparameter:</b> $R_{Soll} = 1000mm$ ; $w = 160mm$		
<b>Anmerkungen:</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>„Feed- Override“: 50%</li><li>Versuch erfolgreich</li></ul>	

Versuchsprotokoll der Versuchsreihe V1b		T055 – V1b – Vor – w160_R1000 – 1/1
<b>Datum:</b> 09.04.2013	<b>Uhrzeit:</b> 17:15	<b>Bediener:</b> Tobias Otto-Adamczak, Stefan Orosz
<b>ProTUBA-Dateiname/ Ablagepfad:</b> I:\OE110\2_Projekte\125237 HEXABEND - Priber\10 Hexabend PLUS\Versuche_Orosz\Orosz_V1b__Vorversuch		
<b>Ausgangslänge Biegehalbzeug:</b> 1135 mm	<b>Länge Nachschieberohr:</b> 665 mm	<b>Lufttemperatur:</b> 23,3°C
<b>Versuchsziel:</b> Abschätzung des Rückfederungseffektes		
<b>maßgebende Prozessparameter:</b> $R_{Soll} = 1000mm$ ; $w = 250mm$		
<b>Anmerkungen:</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>„Feed- Override“: 50%</li><li>Versuch erfolgreich</li></ul>	

Versuchsprotokoll der Versuchsreihe V1b		T056 – V1b – w250 – 1/4
<b>Datum:</b> 10.4.2013	<b>Uhrzeit:</b> 09:40	<b>Bediener:</b> Tobias Otto-Adamczak, Stefan Orosz
<b>ProTUBA-Dateiname/ Ablagepfad:</b> I:\OE110\2_Projekte\125237 HEXABEND - Priber\10 Hexabend PLUS\Versuche_Orosz\Orosz_V1b_max_Biegefaktor		
<b>Ausgangslänge Biegehalbzeug:</b> 2000 mm	<b>Länge Nachschieberohr:</b> 665 mm	<b>Lufttemperatur:</b> 23,3°C
<b>Versuchsziel:</b> Ermittlung des größten erzielbaren Biegeradius, bei dem die Wiederholgenauigkeit gegeben ist		
<b>maßgebende Prozessparameter:</b> $R_{Soll1} = 4000mm$ ; $R_{Soll2} = 2000mm$ $w = 250mm$		
<b>Anmerkungen:</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>„Feed- Override“: 50%</li><li>Versuch erfolgreich</li></ul>	

Versuchsprotokoll der Versuchsreihe V1b		T057 – V1b – w250 – 2/4
<b>Datum:</b> 10.4.2013	<b>Uhrzeit:</b> 10:40	<b>Bediener:</b> Tobias Otto-Adamczak, Stefan Orosz
<b>ProTUBA-Dateiname/ Ablagepfad:</b> I:\OE110\2_Projekte\125237 HEXABEND - Priber\10 Hexabend PLUS\Versuche_Orosz\Orosz_V1b_max_Biegefaktor		
<b>Ausgangslänge Biegehalbzeug:</b> 2000 mm	<b>Länge Nachschieberohr:</b> 665 mm	<b>Lufttemperatur:</b> 23,8 °C
<b>Versuchsziel:</b> Ermittlung des größten erzielbaren Biegeradius, bei dem die Wiederholgenauigkeit gegeben ist		
<b>maßgebende Prozessparameter:</b> $R_{Soll1} = 4000mm$ ; $R_{Soll2} = 2000mm$ $w = 250mm$		
<b>Anmerkungen:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>„Feed- Override“: 50%</li> <li>Versuch erfolgreich</li> </ul>	

Versuchsprotokoll der Versuchsreihe V1b		T058 – V1b – w250 – 3/4
<b>Datum:</b> 10.4.2013	<b>Uhrzeit:</b> 11:05	<b>Bediener:</b> Tobias Otto-Adamczak, Stefan Orosz
<b>ProTUBA-Dateiname/ Ablagepfad:</b> I:\OE110\2_Projekte\125237 HEXABEND - Priber\10 Hexabend PLUS\Versuche_Orosz\Orosz_V1b_max_Biegefaktor		
<b>Ausgangslänge Biegehalbzeug:</b> 2000 mm	<b>Länge Nachschieberohr:</b> 665 mm	<b>Lufttemperatur:</b> 23,9 °C
<b>Versuchsziel:</b> Ermittlung des größten erzielbaren Biegeradius, bei dem die Wiederholgenauigkeit gegeben ist		
<b>maßgebende Prozessparameter:</b> $R_{Soll1} = 4000mm$ ; $R_{Soll2} = 2000mm$ $w = 250mm$		
<b>Anmerkungen:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>„Feed- Override“: 50%</li> <li>Versuch erfolgreich</li> </ul>	

Versuchsprotokoll der Versuchsreihe V1b		T059 – V1b – w250 – 4/4
<b>Datum:</b> 10.4.2013	<b>Uhrzeit:</b> 11:15	<b>Bediener:</b> Tobias Otto-Adamczak, Stefan Orosz
<b>ProTUBA-Dateiname/ Ablagepfad:</b> I:\OE110\2_Projekte\125237 HEXABEND - Priber\10 Hexabend PLUS\Versuche_Orosz\Orosz_V1b_max_Biegefaktor		
<b>Ausgangslänge Biegehalbzeug:</b> 2000 mm	<b>Länge Nachschieberohr:</b> 665 mm	<b>Lufttemperatur:</b> 24 °C
<b>Versuchsziel:</b> Ermittlung des größten erzielbaren Biegeradius, bei dem die Wiederholgenauigkeit gegeben ist		
<b>maßgebende Prozessparameter:</b> $R_{Soll1} = 4000mm$ ; $R_{Soll2} = 2000mm$ $w = 250mm$		
<b>Anmerkungen:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>„Feed- Override“: 50%</li> <li>Versuch erfolgreich</li> </ul>	



Versuchsprotokoll der Versuchsreihe V1b		$T060 - V1b - w100\_R4000/R2000 - 1/1$
<b>Datum:</b> 10.4.2013	<b>Uhrzeit:</b> 11:40	<b>Bediener:</b> Tobias Otto-Adamczak, Stefan Orosz
<b>ProTUBA-Dateiname/ Ablagepfad:</b> I:\OE110\2_Projekte\125237 HEXABEND - Pribel\10 Hexabend PLUS\Versuche_Orosz\Orosz_V1b_max_Biegefaktor		
<b>Ausgangslänge Biegehalbzeug:</b> 2000 mm	<b>Länge Nachschieberohr:</b> 665 mm	<b>Lufttemperatur:</b> 23 °C
<b>Versuchsziel:</b> Ermittlung des größten erzielbaren Biegeradius, bei dem die Wiederholgenauigkeit gegeben ist		
<b>maßgebende Prozessparameter:</b> $R_{Soll1} = 4000mm$ ; $R_{Soll2} = 2000mm$ $w = 100mm$		
<b>Anmerkungen:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>„Feed- Override“: 50%</li> <li>Versuch erfolgreich</li> <li>Kaum Krümmung erkennbar- deshalb nicht für Auswertung verwendbar, Absenkung des R soll bei folg. Teil</li> </ul>	

Versuchsprotokoll der Versuchsreihe V1b		$T061 - V1b - w100\_R2000/R1500 - 1/1$
<b>Datum:</b> 10.4.2013	<b>Uhrzeit:</b> 14:10	<b>Bediener:</b> Tobias Otto-Adamczak, Stefan Orosz
<b>ProTUBA-Dateiname/ Ablagepfad:</b> I:\OE110\2_Projekte\125237 HEXABEND - Pribel\10 Hexabend PLUS\Versuche_Orosz\Orosz_V1b_max_Biegefaktor		
<b>Ausgangslänge Biegehalbzeug:</b> 2000 mm	<b>Länge Nachschieberohr:</b> 665 mm	<b>Lufttemperatur:</b> 24,3 °C
<b>Versuchsziel:</b> Ermittlung des größten erzielbaren Biegeradius, bei dem die Wiederholgenauigkeit gegeben ist		
<b>maßgebende Prozessparameter:</b> $R_{Soll1} = 2000mm$ ; $R_{Soll2} = 1500mm$ $w = 100mm$		
<b>Anmerkungen:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>„Feed- Override“: 50%</li> <li>Versuch erfolgreich</li> <li>Es war fast keine Krümmung feststellbar – somit wurde der Soll-Radius vor dem Biegen der nächsten drei Biegehalbzeuge von <math>R_{Soll1} = 2000mm</math> auf <math>R_{Soll1} = 1000mm</math> verringert.</li> </ul>	

Versuchsprotokoll der Versuchsreihe V1b		$T062 - V1b - w100 - 1/3$
<b>Datum:</b> 10.4.2013	<b>Uhrzeit:</b> 15:15	<b>Bediener:</b> Tobias Otto-Adamczak, Stefan Orosz
<b>ProTUBA-Dateiname/ Ablagepfad:</b> I:\OE110\2_Projekte\125237 HEXABEND - Pribel\10 Hexabend PLUS\Versuche_Orosz\Orosz_V1b_max_Biegefaktor		
<b>Ausgangslänge Biegehalbzeug:</b> 2000 mm	<b>Länge Nachschieberohr:</b> 665 mm	<b>Lufttemperatur:</b> 22,5 °C
<b>Versuchsziel:</b> Ermittlung des größten erzielbaren Biegeradius, bei dem die Wiederholgenauigkeit gegeben ist		
<b>maßgebende Prozessparameter:</b> $R_{Soll1} = 1500mm$ ; $R_{Soll2} = 1000mm$ $w = 100mm$		
<b>Anmerkungen:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>„Feed- Override“: 50%</li> <li>Versuch erfolgreich</li> </ul>	

Versuchsprotokoll der Versuchsreihe V1b		T063 – V1b – w100 – 2/3
<b>Datum:</b> 10.4.2013	<b>Uhrzeit:</b> 15:40	<b>Bediener:</b> Tobias Otto-Adamczak, Stefan Orosz
<b>ProTUBA-Dateiname/ Ablagepfad:</b> I:\OE110\2_Projekte\125237 HEXABEND - Priber\10 Hexabend PLUS\Versuche_Orosz\Orosz_V1b_max_Biegefaktor		
<b>Ausgangslänge Biegehalbzeug:</b> 2000 mm	<b>Länge Nachschieberohr:</b> 665 mm	<b>Lufttemperatur:</b> 24,3°C
<b>Versuchsziel:</b> Ermittlung des größten erzielbaren Biegeradius, bei dem die Wiederholgenauigkeit gegeben ist		
<b>maßgebende Prozessparameter:</b> $R_{soll1} = 1500mm$ ; $R_{soll2} = 1000mm$ $w = 100mm$		
<b>Anmerkungen:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>„Feed- Override“: 50%</li> <li>Versuch erfolgreich</li> </ul>	

Versuchsprotokoll der Versuchsreihe V1b		T064 – V1b – w100 – 3/3
<b>Datum:</b> 10.4.2013	<b>Uhrzeit:</b> 15:45	<b>Bediener:</b> Tobias Otto-Adamczak, Stefan Orosz
<b>ProTUBA-Dateiname/ Ablagepfad:</b> I:\OE110\2_Projekte\125237 HEXABEND - Priber\10 Hexabend PLUS\Versuche_Orosz\Orosz_V1b_max_Biegefaktor		
<b>Ausgangslänge Biegehalbzeug:</b> 2000 mm	<b>Länge Nachschieberohr:</b> 665 mm	<b>Lufttemperatur:</b> 24,9°C
<b>Versuchsziel:</b> Ermittlung des größten erzielbaren Biegeradius, bei dem die Wiederholgenauigkeit gegeben ist		
<b>maßgebende Prozessparameter:</b> $R_{soll1} = 1500mm$ ; $R_{soll2} = 1000mm$ $w = 100mm$		
<b>Anmerkungen:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>„Feed- Override“: 50%</li> <li>Versuch erfolgreich</li> </ul>	

# Anlage - Versuchsprotokolle V2

Die folgenden Tabellen stellen die Versuchsprotokolle aller in der Versuchsreihe V2 durchgeführten Versuche dar.

Versuchsprotokoll der Versuchsreihe V2		$T065 - V2 - v_{fp}500 - 1/2$
<b>Datum:</b> 11.4.2013	<b>Uhrzeit:</b> 14:10	<b>Bediener:</b> Tobias Otto-Adamczak, Stefan Orosz
<b>ProTUBA-Dateiname/ Ablagepfad:</b> I:\OE110\2_Projekte\125237 HEXABEND - Pribor\10 Hexabend PLUS\Versuche_Orosz\Orosz_V2_Prozessgeschwindigkeit		
<b>Ausgangslänge Biegehalbzeug:</b> 2000 mm	<b>Länge Nachschieberohr:</b> 665 mm	<b>Lufttemperatur:</b> 24,4 °C
<b>Versuchsziel:</b> Ermittlung des Einflusses hoher Prozessgeschwindigkeiten auf das Biegeergebnis		
<b>maßgebende Prozessparameter:</b> $R_{Soll} = 300mm$ $v_{fp} = 500mm/min$ (entspricht: $v_{fp} = 1000mm/min$ mit 50% „Feed- Override“) $w = 100mm$		
<b>Anmerkungen:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• „Feed- Override“: 50%</li> <li>• Versuch erfolgreich</li> <li>• Aufzeichnung des Biegevorganges mit Thermokamera</li> <li>• Einsprühen des Biegehalbzeuges mit schwarzer Farbe, um die Wärmeeinflüsse des Hallenlichtes für die Aufzeichnung zu minimieren bringt nicht den erhofften Nutzen, da die Farbe teilweise abgestreift wird</li> </ul>	

Versuchsprotokoll der Versuchsreihe V2		$T066 - V2 - v_{fp}500 - 2/2$
<b>Datum:</b> 11.4.2013	<b>Uhrzeit:</b> 14:45	<b>Bediener:</b> Tobias Otto-Adamczak, Stefan Orosz
<b>ProTUBA-Dateiname/ Ablagepfad:</b> I:\OE110\2_Projekte\125237 HEXABEND - Pribor\10 Hexabend PLUS\Versuche_Orosz\Orosz_V2_Prozessgeschwindigkeit		
<b>Ausgangslänge Biegehalbzeug:</b> 2000 mm	<b>Länge Nachschieberohr:</b> 665 mm	<b>Lufttemperatur:</b> 26 °C
<b>Versuchsziel:</b> Ermittlung des Einflusses hoher Prozessgeschwindigkeiten auf das Biegeergebnis		
<b>maßgebende Prozessparameter:</b> $R_{Soll} = 300mm$ $v_{fp} = 500mm/min$ (entspricht: $v_{fp} = 1000mm/min$ mit 50% „Feed- Override“) $w = 100mm$		
<b>Anmerkungen:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• „Feed- Override“: 50%</li> <li>• Versuch erfolgreich</li> <li>• Aufzeichnung des Biegevorganges mit Thermokamera</li> </ul>	

Versuchsprotokoll der Versuchsreihe V2		T067 – V2 – $v_{fp}1500$ – 1/2
<b>Datum:</b> 11.4.2013	<b>Uhrzeit:</b> 15:45	<b>Bediener:</b> Tobias Otto-Adamczak, Stefan Orosz
<b>ProTUBA-Dateiname/ Ablagepfad:</b> I:\OE110\2_Projekte\125237 HEXABEND - Priber\10 Hexabend PLUS\Versuche_Orosz\Orosz_V2_Prozessgeschwindigkeit		
<b>Ausgangslänge Biegehalbzeug:</b> 2000 mm	<b>Länge Nachschieberohr:</b> 665 mm	<b>Lufttemperatur:</b> 26 °C
<b>Versuchsziel:</b> Ermittlung des Einflusses hoher Prozessgeschwindigkeiten auf das Biegeergebnis		
<b>maßgebende Prozessparameter:</b> $R_{Soll} = 300mm$ $v_{fp} = 1500mm/min$ (entspricht: $v_{fp} = 3000mm/min$ mit 50% „Feed-Override“) $w = 100mm$		
<b>Anmerkungen:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• „Feed- Override“: 50%</li> <li>• Versuch erfolgreich</li> <li>• Biegeteil fällt während der Zwischengeraden nach links (aus Perspektive der Pusher-Vorschubrichtung) ab – Biegevorgang konnte jedoch nach Richten des Biegeteiles fortgesetzt werden</li> <li>• Länge der Zwischengerade deshalb auf <math>l = 40mm</math> verringert</li> <li>• Aufzeichnung des Biegevorganges mit Thermokamera</li> </ul>	

Versuchsprotokoll der Versuchsreihe V2		T068 – V2 – $v_{fp}1500$ – 2/2
<b>Datum:</b> 11.4.2013	<b>Uhrzeit:</b> 16:30	<b>Bediener:</b> Tobias Otto-Adamczak, Stefan Orosz
<b>ProTUBA-Dateiname/ Ablagepfad:</b> I:\OE110\2_Projekte\125237 HEXABEND - Priber\10 Hexabend PLUS\Versuche_Orosz\Orosz_V2_Prozessgeschwindigkeit		
<b>Ausgangslänge Biegehalbzeug:</b> 2000 mm	<b>Länge Nachschieberohr:</b> 665 mm	<b>Lufttemperatur:</b> 26 °C
<b>Versuchsziel:</b> Ermittlung des Einflusses hoher Prozessgeschwindigkeiten auf das Biegeergebnis		
<b>maßgebende Prozessparameter:</b> $R_{Soll} = 300mm$ $v_{fp} = 1500mm/min$ (entspricht: $v_{fp} = 3000mm/min$ mit 50% „Feed-Override“) $w = 100mm$		
<b>Anmerkungen:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• „Feed- Override“: 50%</li> <li>• Versuch erfolgreich</li> <li>• Aufzeichnung des Biegevorganges mit Thermokamera</li> </ul>	

Versuchsprotokoll der Versuchsreihe V2		T069 – V2 – $v_{fp}2500 - 1/2$
<b>Datum:</b> 12.4.2013	<b>Uhrzeit:</b> 11:05	<b>Bediener:</b> Tobias Otto-Adamczak, Stefan Orosz
<b>ProTUBA-Dateiname/ Ablagepfad:</b> I:\OE110\2_Projekte\125237 HEXABEND - Priber\10 Hexabend PLUS\Versuche_Orosz\Orosz_V2_Prozessgeschwindigkeit		
<b>Ausgangslänge Biegehalbzeug:</b> 2000 mm	<b>Länge Nachschieberohr:</b> 665 mm	<b>Lufttemperatur:</b> 24 °C
<b>Versuchsziel:</b> Ermittlung des Einflusses hoher Prozessgeschwindigkeiten auf das Biegeergebnis		
<b>maßgebende Prozessparameter:</b> $R_{Soll} = 300mm$ $v_{fp} = 2500mm/min$ (entspricht: $v_{fp} = 5000mm/min$ mit 50% „Feed-Override“) $w = 100mm$		
<b>Anmerkungen:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• „Feed- Override“: 50%</li> <li>• Versuch erfolgreich</li> <li>• leichte Geräuschbildung</li> <li>• Temperatur auf Biegeteiloberfläche direkt nach der Entnahme aus Maschine ca. 40°C</li> <li>• Aufzeichnung des Biegevorganges mit Thermokamera</li> </ul>	

Versuchsprotokoll der Versuchsreihe V2		T070 – V2 – $v_{fp}2500 - 2/2$
<b>Datum:</b> 12.4.2013	<b>Uhrzeit:</b> 11:35	<b>Bediener:</b> Tobias Otto-Adamczak, Stefan Orosz
<b>ProTUBA-Dateiname/ Ablagepfad:</b> I:\OE110\2_Projekte\125237 HEXABEND - Priber\10 Hexabend PLUS\Versuche_Orosz\Orosz_V2_Prozessgeschwindigkeit		
<b>Ausgangslänge Biegehalbzeug:</b> 2000 mm	<b>Länge Nachschieberohr:</b> 665 mm	<b>Lufttemperatur:</b> 24 °C
<b>Versuchsziel:</b> Ermittlung des Einflusses hoher Prozessgeschwindigkeiten auf das Biegeergebnis		
<b>maßgebende Prozessparameter:</b> $R_{Soll} = 300mm$ $v_{fp} = 2500mm/min$ (entspricht: $v_{fp} = 5000mm/min$ mit 50% „Feed-Override“) $w = 100mm$		
<b>Anmerkungen:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• „Feed- Override“: 50%</li> <li>• Versuch erfolgreich</li> <li>• leichte Geräuschbildung</li> <li>• Temperatur auf Biegeteiloberfläche direkt nach der Entnahme aus Maschine ca. 40°C</li> <li>• Aufzeichnung des Biegevorganges mit Thermokamera</li> </ul>	

Versuchsprotokoll der Versuchsreihe V2		T071 – V2 – $v_{fp}4000$ – 1/2
<b>Datum:</b> 12.4.2013	<b>Uhrzeit:</b> 14:30	<b>Bediener:</b> Tobias Otto-Adamczak, Stefan Orosz
<b>ProTUBA-Dateiname/ Ablagepfad:</b> I:\OE110\2_Projekte\125237 HEXABEND - Priber\10 Hexabend PLUS\Versuche_Orosz\Orosz_V2_Prozessgeschwindigkeit		
<b>Ausgangslänge Biegehalbzeug:</b> 2000 mm	<b>Länge Nachschieberohr:</b> 665 mm	<b>Lufttemperatur:</b> 24 °C
<b>Versuchsziel:</b> Ermittlung des Einflusses hoher Prozessgeschwindigkeiten auf das Biegeergebnis		
<b>maßgebende Prozessparameter:</b> $R_{soll} = 300mm$ $v_{fp} = 4000mm/min$ (entspricht: $v_{fp} = 8000mm/min$ mit 50% „Feed-Override“) $w = 100mm$		
<b>Anmerkungen:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• „Feed- Override“: 50%</li> <li>• Versuch erfolgreich</li> <li>• leichte Geräuschbildung</li> <li>• Temperatur auf Biegeteiloberfläche direkt nach der Entnahme aus Maschine ca. 42,5°C</li> <li>• Aufzeichnung des Biegevorganges mit Thermokamera</li> </ul>	

Versuchsprotokoll der Versuchsreihe V2		T072 – V2 – $v_{fp}4000$ – 2/2
<b>Datum:</b> 12.4.2013	<b>Uhrzeit:</b> 14:40	<b>Bediener:</b> Tobias Otto-Adamczak, Stefan Orosz
<b>ProTUBA-Dateiname/ Ablagepfad:</b> I:\OE110\2_Projekte\125237 HEXABEND - Priber\10 Hexabend PLUS\Versuche_Orosz\Orosz_V2_Prozessgeschwindigkeit		
<b>Ausgangslänge Biegehalbzeug:</b> 2000 mm	<b>Länge Nachschieberohr:</b> 665 mm	<b>Lufttemperatur:</b> 24 °C
<b>Versuchsziel:</b> Ermittlung des Einflusses hoher Prozessgeschwindigkeiten auf das Biegeergebnis		
<b>maßgebende Prozessparameter:</b> $R_{soll} = 300mm$ $v_{fp} = 4000mm/min$ (entspricht: $v_{fp} = 8000mm/min$ mit 50% „Feed-Override“) $w = 100mm$		
<b>Anmerkungen:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• „Feed- Override“: 50%</li> <li>• Versuch erfolgreich</li> <li>• leichte Geräuschbildung</li> <li>• Temperatur auf Biegeteiloberfläche direkt nach der Entnahme aus Maschine ca. 42,5°C</li> <li>• Aufzeichnung des Biegevorganges mit Thermokamera</li> </ul>	

## Anlage - Auswertungstabellen

In den folgenden Tabellen und deren Beschreibungen sind die wichtigsten Messwerte aus der Auswertung der Biegeergebnisse der Versuchsreihen V1a und V1b zusammengefasst. Sie dienen als Grundlage für die Versuchsauswertung im Kapitel 5.

### Versuchsreihe V1a:

	T048	T049	T050	T051
	w=100mm	w=90mm		
R Ist [mm]	337,29	351,73	352,06	353,10

#### Anmerkungen:

- Die Biegebögen würden mit dem mobilen Koordinatenmessgerät vermessen.
- R Soll betrug bei allen 4 Teilen 160mm
- Die Berechnung des Biegeradius *R Ist* erfolgte mit Hilfe eines mathematischen Algorithmus, welcher die Koordinaten der einzelnen Antastpunkte verwendet.
- Bei Teil T051 lag aus Versehen die Schweißnaht beim Biegen nicht am Innenbogen.

#### Auswertung:

Der minimal erzielbare Biegeradius lag bei  $R_{Ist} = 337mm$ .

Das entspricht einem Biegefaktor  $B = \frac{R}{D} = \frac{337mm}{65mm} = 5,2$ .

Auffällig ist, dass mit dem größeren Werkzeugabstand ( $w = 100mm$ ) ein kleinerer Biegeradius erzeugt werden konnte, als mit dem kleineren Werkzeugabstand ( $w = 90mm$ ).

### Versuchsreihe V1b:

[illegible]

**Erläuterungen:**

Um die Wiederholgenauigkeit von Bogen zu Bogen (grünes Feld) in Prozent zu bestimmen, wurde die R Ist-Standardabweichung in mm durch den R Ist-Mittelwert in mm geteilt, und mit dem Faktor 2 multipliziert. Für die Breite der Normalverteilung wurde die doppelte Standardabweichung festgelegt, deswegen wird der Faktor 2 verwendet.

Zum Vergleich ist in der letzten Spalte die Messunsicherheit der Messprozedur an sich (blaues Feld) errechnet worden. Dafür wurde der Mittelwert aus den einzelnen Messunsicherheiten der Teile T056- T059 gebildet und ebenfalls mit dem Faktor 2 multipliziert.

**Auswertung:**

Es zeigt sich eindeutig, dass die Messunsicherheit der Messprozedur an sich etwa gleich groß der Wiederholgenauigkeit von Bogen zu Bogen ist. Außerdem lässt sich erkennen, dass mit kleinerem Soll-Radius auch die Messunsicherheit und in nahezu gleichem Maße die Wiederholgenauigkeit abnimmt. Die für diese Arbeit festgelegte Obergrenze für die Wiederholgenauigkeit von Bogen zu Bogen von 3 % wurde vom Biegeradius R Soll=2000mm (R Ist- Mittelwert=3543mm) unterschritten - die Wiederholgenauigkeit von Bogen zu Bogen beträgt maximal 2,75 %.



Vergleich der Biegeradien mit R Soll=1000mm						
	T062	T063	T064	R Ist- Mittelwert [mm]	R Ist- Standardabweichung [mm]	Wiederholgenauigkeit
R Ist- Mittelwert [mm]	4103	4092	4191	4129	54	2,63%
Vergleich der Biegeradien mit R Soll=1500mm						
	T062	T063	T064	R Ist- Mittelwert [mm]	R Ist- Standardabweichung [mm]	Wiederholgenauigkeit
R Ist- Mittelwert [mm]	14357	13419	14302	14026	526	7,51%

Erläuterungen:

Um die Wiederholgenauigkeit von Bogen zu Bogen (grünes Feld) in Prozent zu bestimmen, wurde die R Ist -Standardabweichung in mm durch den R Ist- Mittelwert in mm geteilt, und mit dem Faktor 2 multipliziert. Für die Breite der Normalverteilung wurde die doppelte Standardabweichung festgelegt, deswegen wird der Faktor 2 verwendet.  
Zum Vergleich ist in der letzten Spalte die Messunsicherheit der Messprozedur an sich (blaues Feld) errechnet worden. Dafür wurde der Mittelwert aus den einzelnen Messunsicherheiten der Teile T056- T059 gebildet und ebenfalls mit dem Faktor 2 multipliziert.

Auswertung:

Der Unterschied zwischen der Wiederholgenauigkeit von Bogen zu Bogen, und der Messunsicherheit der Messprozedur an sich ist größer als bei den Teilen T056-T059.  
Zum Beispiel ist die Messunsicherheit der Messprozedur an sich des Biegeradius R Soll = 1000mm etwa um den Faktor 5 kleiner, als die Wiederholgenauigkeit von Biegeteil zu Biegeteil.  
Die für diese Arbeit festgelegte Obergrenze für die Wiederholgenauigkeit von Bogen zu Bogen von 3 % wurde vom Biegeradius R Soll=1000mm (R Ist- Mittelwert=4129mm) unterschritten - die Wiederholgenauigkeit von Bogen zu Bogen beträgt maximal 2,36% .  
Außerdem lässt sich erkennen, dass mit kleinerem Soll-Radius auch die Messunsicherheit und die Wiederholgenauigkeit abnimmt, dieses Mal aber nicht in nahezu gleichem Maße, wie es bei den Teilen T056-T059 der Fall war.

## Anlage - NC-Programm

An dieser Stelle ist ein von der Prozessplanungssoftware ProTUBA generiertes NC-Programm vom Biegeteil T051 aufgeführt.

```
; Projekt:  Orosz_V1A_min_Biegefaktor
; Teil:      Bogen R160 unkorrr, WZdist 90
; Maschine:  HexaBend
; Werkzeug:  MHG, festes WZ R40
; Uhrzeit:   2013-03-22 10:35:40

; --- Prolog ---
G500; Frames aus, Basis-NPV aktiv
G90; Absolutmasz
G641 ADIS=0.1; Kontur verschleifen
G603; Genauhalt-Kriterium: Interpolator-Ende

;Koordinatenversatz
TRANS X-8.4 Y102.1 Z-58.5 A0 B0 C0 U0 V0

; Plattform gerade stellen
FGROUP(X,Y,Z)
G1 F6000 A0 B0 C180
G1 F2000 X0 Y0 Z100

; Traverse hochfahren
M80; Traverse hoch
$AC_TIMER[1]=0; Timer Reset und Start
WHILE ($A_IN[18]==0) AND ($AC_TIMER[1]<20)
    G4 F1; Verweilzeit
ENDWHILE
M1; wahlweiser Halt

; Pusher zurueckziehen (Ausgangsposition)
G1 FA[U]=9000 POS[U]=650

M0; Halt - Rohr einlegen
```

```
; Traverse runterfahren
M81; Traverse runter
$AC_TIMER[1]=0; Timer Reset und Start
WHILE ($A_IN[17]==0) AND ($AC_TIMER[1]<20)
    G4 F1; Verweilzeit
ENDWHILE
M1; wahlweiser Halt

; Datenaufzeichnung Pfau [ms]
CCTRACE(60000)
FGROUP(U)

; --- Programm-Hauptteil ---
G1 F9000 X=0.0 Y=0.0 Z=90.0 A=0.0 B=0.0 U=1583.0
; -- Gerade vorn --
F2800 U=2318.0
; -- Bogen --
F1500 Y=2.7 Z=90.0 A=1.8 C=180.0 U=2323.0
Y=5.3 Z=89.8 A=3.6 U=2328.0
Y=7.7 Z=89.6 A=5.4 U=2333.0
Y=10.0 Z=89.4 A=7.2 U=2338.0
Y=12.1 Z=89.1 A=9.0 U=2343.0
Y=14.0 Z=88.8 A=10.7 U=2348.0
Y=15.7 Z=88.4 A=12.5 U=2353.0
Y=17.3 Z=88.0 A=14.3 U=2358.0
Y=18.8 Z=87.6 A=16.1 U=2363.0
Y=20.0 Z=87.3 A=17.9 U=2368.0
Y=21.2 Z=86.9 A=19.7 U=2373.0
Y=22.1 Z=86.5 A=21.5 U=2378.0
Y=22.9 Z=86.2 A=23.3 U=2383.0
Y=23.5 Z=85.9 A=25.1 U=2388.0
Y=24.0 Z=85.7 A=26.9 U=2393.0
Y=24.4 Z=85.5 A=28.6 U=2398.0
Y=24.6 Z=85.4 A=30.4 U=2403.0
Y=24.7 Z=85.3 A=32.2 U=2408.0
U=2718.0
; -- Gerade hinten --
F2800 Y=22.1 Z=86.1 A=30.4 U=2723.0
Y=19.6 Z=86.7 A=28.6 U=2728.0
Y=17.3 Z=87.3 A=26.9 U=2733.0
Y=15.1 Z=87.8 A=25.1 U=2738.0
Y=13.0 Z=88.2 A=23.3 U=2743.0
Y=11.1 Z=88.6 A=21.5 U=2748.0
Y=9.4 Z=88.9 A=19.7 U=2753.0
Y=7.7 Z=89.2 A=17.9 U=2758.0
Y=6.3 Z=89.4 A=16.1 U=2763.0
Y=5.0 Z=89.6 A=14.3 U=2768.0
Y=3.8 Z=89.7 A=12.5 U=2773.0
```

```
Y=2.8 Z=89.8 A=10.7 U=2778.0
Y=1.9 Z=89.9 A=9.0 U=2783.0
Y=1.2 Z=89.9 A=7.2 U=2788.0
Y=0.7 Z=90.0 A=5.4 U=2793.0
Y=0.3 Z=90.0 A=3.6 U=2798.0
Y=0.1 Z=90.0 A=1.8 U=2803.0
Y=0.0 A=0.0 U=2808.0
U=2848.0
```

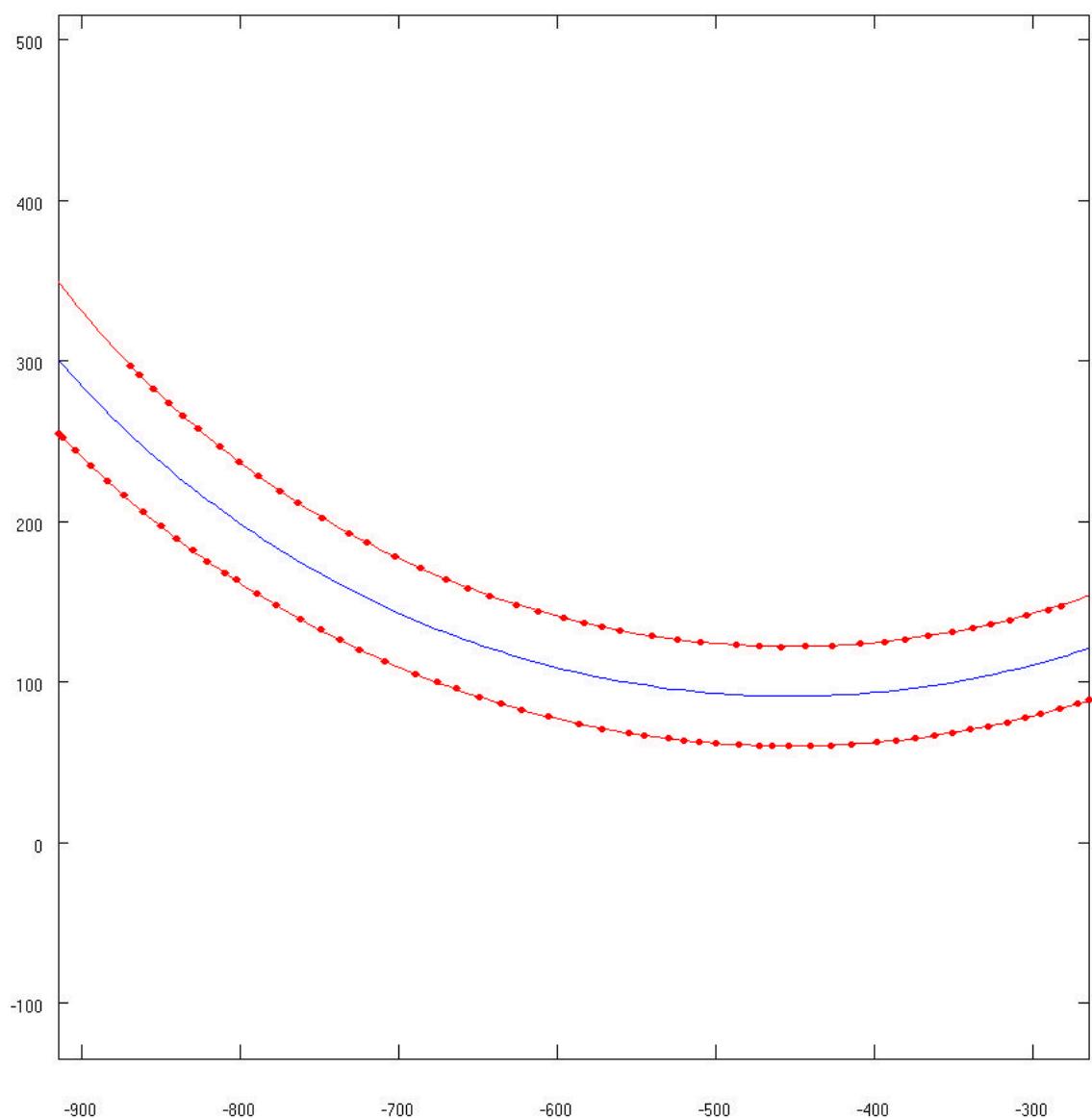
```
; --- Epilog ---
; Traverse hochfahren
M80; Traverse hoch
$AC_TIMER[1]=0; Timer Reset und Start
WHILE ($A_IN[18]==0) AND ($AC_TIMER[1]<20.0)
    G4 F1; Verweilzeit
ENDWHILE
M0; Halt - Teil abnehmen

; Pusher zurueckziehen (Ausgangsposition)
G1 FA[U]=9000 POS[U]=650
M0; Halt - Rohr entnehmen

; Plattform gerade stellen
FGROUP(X,Y,Z)
G1 F6000 A0 B0
G1 F2000 X0 Y0 Z100
M30
```

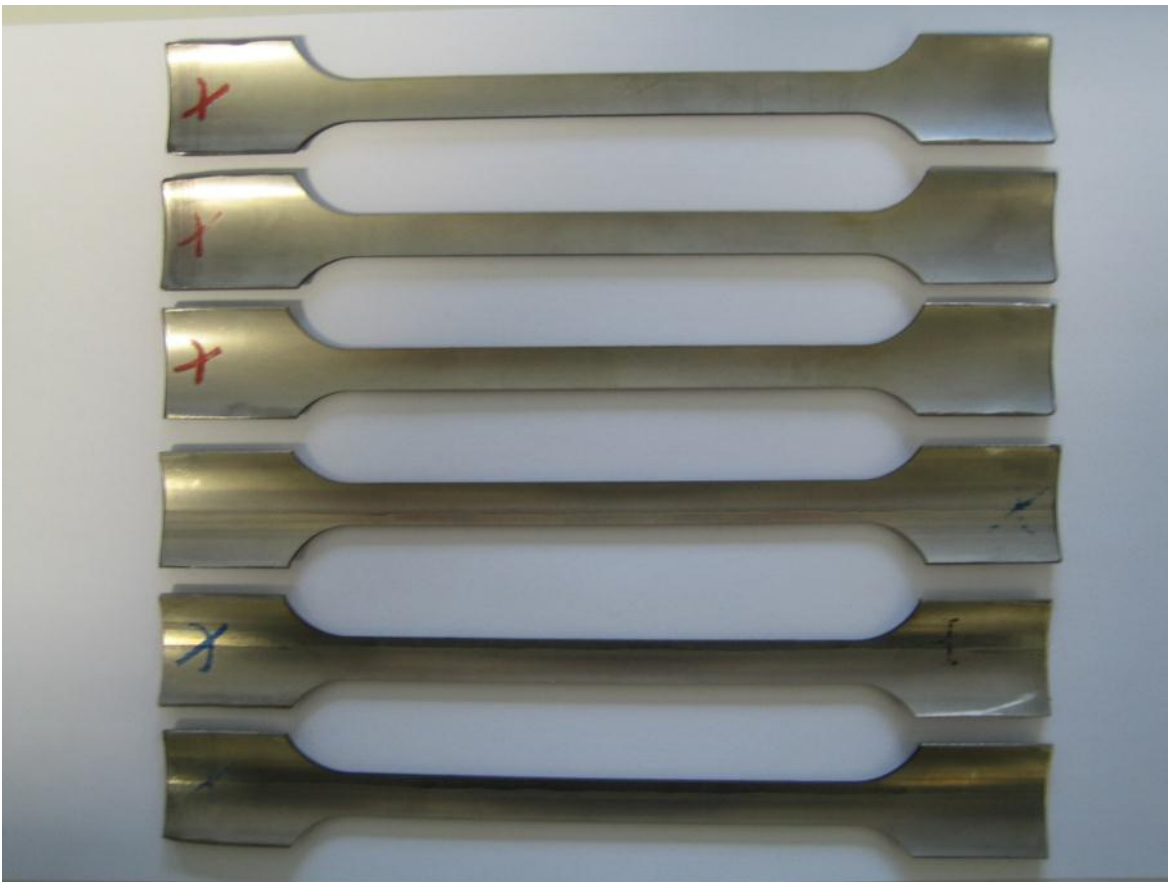
## Anlage - Darstellung der Antastpunkte

In dieser Abbildung ist die Lage der einzelnen Antastpunkte auf der um den halben Rohrdurchmesser nach außen oder innen versetzten Mittellinie des Kreisbogens dargestellt. Die blaue Linie zeigt diese mit dem mathematischen Algorithmus approximierte Mittellinie des Kreisbogens, welche zur Berechnung des Ist-Radius verwendet wurde.



## Anlage - Zugproben

An dieser Stelle sind die sechs Zugproben dargestellt, mit denen die Zugversuche durchgeführt wurden, um den Einfluss der Lage der Schweißnaht herauszustellen.



## **Selbstständigkeitserklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Chemnitz, den 24.Mai 2013

Stefan Orosz